

논문 15-4-14

절연막층의 플라즈마 산화시간에 따른 CoFe/AlO/CoFe/NiFe 구조의 터널자기저항 효과 연구

Effect of Plasma Oxidation Time on TMR Devices of CoFe/AlO/CoFe/NiFe Structure

이영민, 송오성

(Young Min Lee and Ohsung Song)

Abstract

We investigated the evolution of magnetoresistance and magnetic property of tunneling magnetoresistive(TMR) device with microstructure and plasma oxidation time. TMR devices have potential applications for non-volatile MRAM and high density HDD reading head. We prepared the tunnel magnetoresistance(TMR) devices of Ta(50 Å)/NiFe(50 Å)/IrMn(150 Å)/CoFe(50 Å)/Al(13 Å)-O/CoFe(40 Å)/NiFe(400 Å)/Ta(50 Å) structure which have $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ junction area on $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ Si/SiO₂(1000 Å) substrates by an inductively coupled plasma(ICP) magnetron sputter. We fabricated the insulating layer using an ICP plasma oxidation method by with various oxidation time from 30 sec to 360 sec, and measured resistances and magnetoresistance(MR) ratios of TMR devices. We found that the oxidized sample for oxidation time of 80 sec showed the highest MR ratio of 30.31 %, while the calculated value regarding inhomogeneous current effect indicated 25.18 %. We used transmission electron microscope(TEM) to investigate microstructural evolution of insulating layer. Comparing the cross-sectional TEM images at oxidation time of 150 sec and 360 sec, we found that the thickness and thickness variation of 360 sec-oxidized insulating layer became 30% and 40% larger than those of 150 sec-oxidized layer, respectively. Therefore, our results imply that increase of thickness variation with oxidation time may be one of the major reasons of the MR decrease.

Key Words : TMR, ICP, Tunnel magnetoresistance, MRAM, Oxidation time dependence.

1. 서론

최근 정보기기의 고속도 및 고밀도, 휴대화가 진행됨에 따라 거대자기저항을 이용한 비휘발성 메모리 소자 및 자기저항(magnetoresistive : MR) [1]헤드에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현

재 활발히 연구가 진행되고 있는 비휘발성 메모리 소자로서 MRAM과 FRAM이 있으며, 이와 같은 비휘발성 메모리 소자의 적용 분야는 거의 모든 휴대용 정보기기로 확대되고있는 추세이다. 특히, MRAM[2,3]이란 MR 박막 재료의 자화 상태를 이용하여 정보를 기억하는 기억 소자로서, 비휘발성 및 radiation hardness 등의 특성을 나타내는 차세대 메모리 소자로 현재 연구 개발이 진행 중이다.

TMR(tunneling magnetoresistance) 현상은 강자성층/절연층/강자성층 구조를 갖는 박막에서 면에 수직인 방향으로 전류를 흘려주면, 양쪽 강자성

서울시립대학교 신소재공학과
(서울시 동대문구 전농동 90,
Fax: 02-2215-5863
E-mail : e0min@sidae.uos.ac.kr)
2001년 11월 23일 접수, 2001년 12월 17일 1차 심사완료,
2002년 1월 12일 최종 심사완료

층의 스핀 배열 상태에 따라 절연층에서의 전자 터널링 확률이 달라짐으로 접합 저항이 변하는 현상으로 1975년 Julliere[4]에 의해 처음 발견되었고, 그 후 1989년 Slonczewski[5]에 의해 수학적으로 이론이 정립되었다. 그러나, 당시에는 극저온에서만 자기저항 현상을 보여 그다지 실용성을 갖지 못하다가 1995년 Moodera[6]가 evaporation 방법을 이용하여 금속 박막을 성막하고, 글로우 방전(glow discharge) 방법으로 절연막을 형성하여 상온에서 18%의 자기저항비를 얻는 데 성공하고, 비슷한 시기에 Miyazaki[7]가 절연막을 대기 중에서 산화시키는 방법으로 18%의 상온 자기저항비를 얻는 데 성공한 이후, 고밀도 하드 디스크의 센서나 비휘발성 메모리인 MRAM에의 응용 등에 큰 가능성을 보여 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 Ta/NiFe/IrMn/CoFe/AlO/CoFe/NiFe/Ta 구조의 TMR 소자를 제작하여 소자 제작에 있어서 중요한 변수가 되는 절연 산화막 형성 공정 중 플라즈마 산화시간을 달리하여 이때의 절연막층의 미세구조 변화가 TMR 소자 특성에 미치는 영향과 전기적, 자기적 특성 변화를 알아보고자 하였다.

2. 실험

TMR 소자를 형성할 기판으로 누설전류를 차단하기 위해 1000 Å의 열산화막을 형성한 직경 10 cm의 (100)Si 기판을 2.5×2.5 cm²의 크기로 절단하여 사용하였다. 표면의 유기물이나 기타 이물질 제거하기 위해 먼저 아세톤에 담그어 30분간 초음파 세척을 행하고, 70 °C의 에탄올로 세척하였다.

메탈 마스크를 사용하여 그림 1과 같은 형태로 수직구조가 Ta(50 Å)/NiFe(50 Å)/IrMn(150 Å)/CoFe(50 Å)/Al(13 Å)-O/CoFe(40 Å)/NiFe(400 Å)/Ta(50 Å) 구조를 가진 선폭 100 μm의 십자형 터널접합 소자를 만들어 최종 십자형 터널접합소자의 형태를 그림 2에 나타내었다. 완성된 터널접합 소자는 그림 2와 같이 상부막의 한쪽 끝과 하부막의 한쪽 끝을 연결하여 전압을 걸어주고 다른 한쪽 끝을 연결하여 저항을 측정하는 방법을 사용하였다.

이 때 사용한 합금 타겟의 조성은 각각 CoFe = 75:25 at %, NiFe = 80:20 at %, IrMn = 21.5:78.5 at %, FeMn = 46:54 at %을 사용하였고, 나머지는 99.99% 이상의 순금속을 사용하였다.

시편준비실, 산화실, 자성막형성실로 이루어진

ICP 지원 마그네트론 스퍼터링으로[8] 각 층을 만들고, Al을 산화시킴으로 산화막을 형성하여 상기 구조를 갖는 TMR 소자를 제작하였다.

전처리가 끝난 기판을 시편준비실(sample preparation chamber)에 위치시킨 후, 3.0×10⁻⁵ Pa의 압력이 될 때까지 진공으로 만든 후 자성막형성실(ferromagnet depositon chamber)로 옮겼다. 자성막형성실에서 3.0×10⁻⁶ Pa의 진공으로 만든

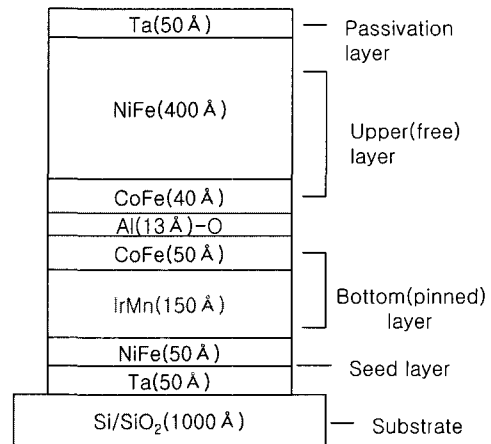


그림 1. 시편의 수직단면 개략도.

Fig. 1. Schematic illustration of cross-sectional structure of a sample.

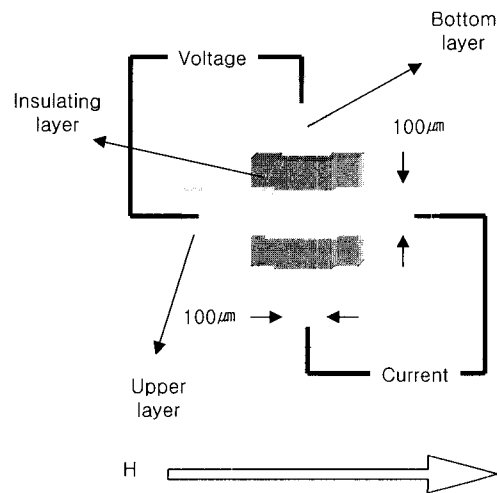


그림 2. 십자형 TMR 시편.

Fig. 2. Top view of a TMR sample.

후 하부막을 형성하고 다시 대기중으로 꺼내어 메탈 마스크를 교환하였다. 다시 산화실(Al deposition chamber)로 옮겨 1.4×10^{-5} Pa의 진공으로 만들고, Al을 증착 한 후 산소를 흘려주어 산소 플라즈마로 산화를 시켰다. 다시 대기 중으로 꺼내어 마지막 마스크로 교환하고, 같은 순서대로 자성막 형성실에서 상부막을 형성하였다. 산화막층은 Al을 13 Å 두께로 증착시킨 후에 플라즈마 산화법으로 산화시켰다. 이 실험에서의 자세한 스퍼터링 조건은 이전에 발표된 논문과 동일하다[9].

Al증착과 산화는 자성막과는 다른 산화전용 챔버 내에서 행하여졌으며, 1.4×10^{-5} Pa의 진공으로 만든 후 Ar을 흘려주어 Al을 13 Å 두께로 증착하고 그 후에 산소를 일정량 흘려주어 플라즈마 산화를 실시하였다. 절연막층(Al)의 산화시간은 산화 시간에 따른 TMR 소자의 성질을 알아보기 위하여 30, 50, 80, 150, 220, 360 sec의 6가지로 달리하면서 절연층을 만들고 이후의 성막은 같은 조건으로 진행하였다.

그림 3과 같이 직류 4단자법을 사용하여 완성된 십자형 시편의 MR비와 저항을 측정하였다. 하지만 측 한쪽과 상부측 한쪽을 연결하여 전류를 흘려주고, 또 다른 한쪽에서 전압을 측정하는 방법으로 저항을 측정하였다. 십자형의 소자 측정을 위하여 4개의 터미널을 한 개의 미세 축에 의하여 고정시킨 four point probe를 사용하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 2개의 단자에 전류를 흐르게 한 후, 나머지 2개의 단자에서 전압을 측정하였다.

이 때의 인가전압은 1 mV로 하였고, 200 Oe에서 200 Oe까지의 자장을 연속적으로 흐르게 하여 2 Oe마다의 저항을 측정하여 최고 저항과 최소 저항의 차이로 MR비를 측정하였다. MR비의 정의는 다음과 같이 식 (1)로 하였다.

$$MR = \frac{\Delta R}{R_p} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 ΔR 은 저항의 최고값과 최소값의 차이이고, R_p 는 두 자성층이 평행상태일 때의 저항, 즉 저항의 최소값이다.

절연막층의 산화시간을 달리하여 완성된 TMR 소자의 수직 단면을 투과전자현미경(transmission electron microscopy : TEM)으로 관찰하였다. 수직단면 투과전자현미경 관찰을 위한 단면시편은 메탈마스크를 사용하지 않고, 적층구조는 동일하게

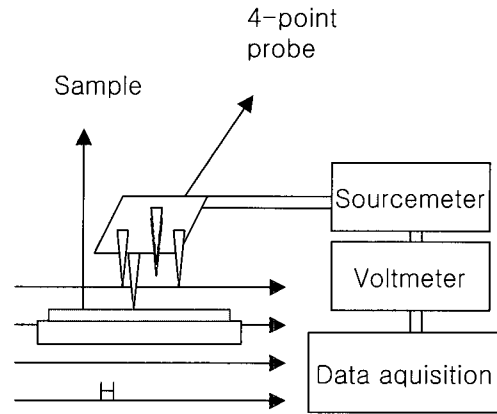


그림 3. 전기적 측정장치 개략도.

Fig. 3. Schematic illustration of a probe system.

제작하였다. TEM 관찰을 위해 준비된 시편조각을 성막면을 맞대어 2개씩 붙여 Mo 튜브에 넣고 에폭시로 고정시킨 후 다이아몬드 절단기로 절단하고, 약 20 μ m 두께까지 트리포드(tripod)를 이용하여 연마하였다. 이후 PIPS(precision ion polishing system, 정밀 이온 연삭 시스템)를 이용하여 전자빔이 투과될 정도로 얇게 가공하여 관찰하였다. 최종적으로 200 KeV의 투과전자현미경을 이용하여 절연막의 두께 편차를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 산화시간이 360 sec인 TMR 시편의 외부자계에 따른 저항의 변화를 나타낸 그래프이다. 두 자성층 중 한쪽을 반강자성체로 고정시킨 스핀밸브구조의 TMR 소자에서 전형적으로 보이는 자계 저항 그래프임을 알 수 있었으며, 화살표로 상하자층의 자화 방향을 표시하였다.

그림 5는 스핀밸브 구조를 갖는 시편의 산화시간에 따른 저항값을 나타낸 것이다. 흰 원은 측정된 값이고, 검은 사각형은 해당되는 산화시간에서의 산술평균 저항값이다. 그림에서 알 수 있듯이 산화시간이 증가함에 따라 지수함수적으로 저항이 증가함을 알 수 있었다. 그 원인은 첫째, 산화시간이 짧을 경우엔 Al 금속의 산화가 완전히 이루어지지 않았으나, 산화시간이 길어짐에 따라 Al의 산화가 완전히 이루어지고, AlO 절연층의 두께 또한 두꺼워지기 때문으로 볼 수 있다. 둘째로 Al

의 산화가 충분히 이루어진 다음에는 여분의 산소 이온이 하부 자성층까지 산화시키기 때문에 생각되었다[10].

플라즈마 산화시간에 따른 자기저항비의 측정값을 Fig. 6에 나타내었다. 흰 원이 측정된 자기저항비의 산술평균값이다. 측정값에 의하면 80 sec의 산화시간에서 최대의 자기저항비를 보이다가 산화가 진전되면, 자기저항비가 감소함을 알 수 있었다. 단순한 측정값만으로는 80 sec의 산화시간이 가장 적절한 산화시간임을 쉽게 알 수 있으나, 메탈 웨도우 마스크를 이용하여 만든 터널자기저항 소자에서 접합 면적이 크기 때문에 불균일 전류의 영향을 고려하여야만 한다. 즉, 본 실험과 같이 접합 면적이 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 정도되는 경우에

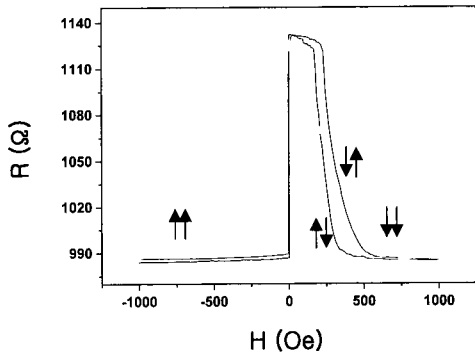


그림 4. 360초 플라즈마 산화시편의 R-H 그래프.
Fig. 4. R-H curve of the specimen of 360 sec-plasma oxidation.

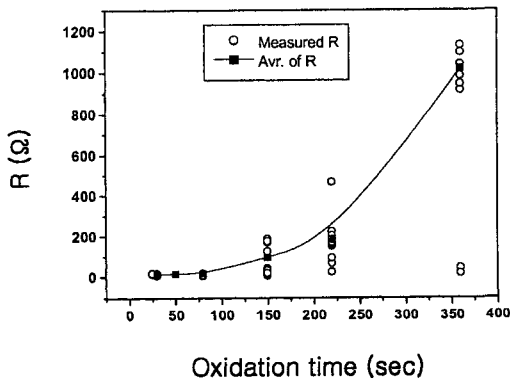


그림 5. 플라즈마 산화시간에 따른 저항의 변화곡선 그래프.
Fig. 5. Plots of resistance as a function of plasma oxidation time.

4단자법으로 측정을 할 때에 실제 전류가 지나게 되는 접합의 모서리부근 불균일한 전류가 흐르게 되고, TMR이 $\Delta R/R_m$ 으로 정의되므로 최소화항 R_m 이 작아져서 상대적으로 TMR값이 크게 측정되는 오류가 발생한다[11]. R. J. Pederson[12]의 모델 의하면 전극저항 R 및 실제 터널저항 R_T 의 관계에서 불균일 전류에 의한 측정저항 R_m 은 상하부 전극의 저항이 비슷할 경우, 식 (2)로 주어져서 극단적인 경우 RT가 (-) 부호를 갖게 된다.

$$R_m = \left(\frac{R \cdot R_T}{2} \right)^{1/2} \coth \left(\frac{R}{2R_T} \right)^{1/2} - \frac{R}{2} \quad (2)$$

여기서 R은 전극의 저항이고 R_T 는 실제 저항, R_m 은 측정되는 겉보기 저항이다. 이러한 배경에 근거하여 측정된 실험에서 R_T 를 고려하고, 각각의 실제 R_m 을 계산할 수 있었다. 본 실험에서 전극저항 R은 상하부 두 평균 10 Ω이었다.

그림 6에 측정된 자기저항비의 평균값과 불균일 전류를 고려하여 계산한 자기저항비를 검은 원으로 표시하였다. 기준저항이 낮은 시편일수록 불균일 전류에 의한 측정오차가 커지므로 측정값과 계산값의 격차가 벌어져서 30 sec 동안 산화를 행한 시편의 경우 불균일전류에 의한 자기저항비 오차가 26.4%로 최대가 되었다. 이 효과를 고려하더라도 80 sec동안 산화를 행한 시편의 자기저항비가 최대임을 보아서 이 실험에서 가장 적절한 플라즈마 산화시간이 80 sec임을 알 수 있었으며, 150 sec 이상의 산화시간에서는 그 오차의 크

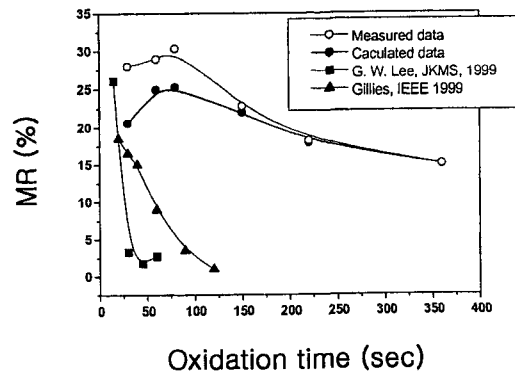


그림 6. 플라즈마 산화시간에 따른 MR의 변화.
Fig. 6. Plots of MR on plasma oxidation time : (●) measured data, (○) calculated data and (■, □) data of other groups.

기가 충분히 작으므로 불균일 전류에 의한 효과를 무시하여도 좋을 것으로 판단되었다. 짧은 산화시간에서 자기저항비가 감소하는 원인으로는 Al 급속이 완전히 산화되지 못하여 절연층의 형성이 치밀하지 못함을 들 수 있다. 그럴 경우 좁은 채널과 같은 저저항 영역으로 전자의 흐름이 집중되는 현상이 발생하는데, 터널링이 일어나는 유효 면적이 감소할 뿐 아니라 에너지 장벽이 1 eV 미만인 곳에서 전자의 흐름이 발생하므로 자기저항비가 감소하는 주요 원인이 될 수 있다[13]. 이 실험에서도 같은 원인으로 짧은 산화시간에서 자기저항비가 감소한 것으로 판단되었다. 검은 사각형과 삼각형은 다른 연구자들이 발표한 플라즈마 산화시간에 따른 자기저항비이다[14,15]. 그림에서 알 수 있듯이 타 실험자의 경우, 50 sec 이상으로 산화시간을 길게 하면 자기저항비의 급격한 감소를 보이는데 비해 본 실험에서는 산화시간이 증가하더라도 상대적으로 자기저항비의 감소가 작음을 알 수 있었다. 다른 연구자들의 실험 결과들과 비교해 볼 때, 본 연구의 실험결과는 산화시간이 증가하더라도 자기저항비의 감소가 상대적으로 크지 않음을 알 수 있었다. 이것은 실제 제품의 양산에 있어서 공정조건 선택 폭이 넓을 수 있음을 의미한다.

산화시간이 증가함에 따라 자기저항비가 감소하는 원인으로는 일반적으로 하부 자성층의 산화를 들 수 있다. 이 시편의 경우 절연층 바로 아래에 있는 자성층은 CoFe이므로 지나친 산화시간으로 인해 하부막의 산화가 일어난 것이라면 CoO나 FeO_x가 생성되어야 한다. 그런 경우에 일어날 수 있는 현상으로는 터널 전자의 스핀 산란으로 인한 자기저항비 감소 외에 CoO가 반강자성체이기 때문에 반강자성체-강자성체의 교환결합 에너지가 증가하여 교환결합 자장이 증가하는 현상이 발생할 수 있다[10].

즉, 교환결합 자장을 측정함에 의해 간접적으로 하부 자성막의 산화 정도를 추정할 수 있다. 그림 7에 산화시간에 따른 교환결합 자장의 크기를, 그림 8에 모든 시편의 기준저항에 따른 교환결합 자장의 크기를 표시해 보았다. 이 경우 반강자성-강자성 교환결합을 깨고 하부막의 자화반전이 일어나는 외부자계의 가운데이고, 저항의 최고값과 최소값의 가운데인 점을 교환결합 자장으로 정의하였다.

그림 7에 의해 산화시간에 따른 교환결합 자장의 의존성은 없음을 알 수 있었다. 산화시간에 관계없이 모든 시편의 교환결합 자장의 크기를 기준 저항값과 비교해 본 Fig. 8을 보아도 교환결합 자장과 기준저항의 연관성이 뚜렷이 보이지 않음을

알 수 있는데, 이것은 이 실험의 범위 내에서는 산화시간의 증가로 저항이 커지더라도 하부 자성막이 반강자성체가 될 만큼 산화가 진전되지 않았음을 나타내는 증거로 볼 수 있다. 그러므로, 산화시간 증가에 따른 자기저항비 감소에는 다른 주된 이유가 있을 것으로 판단되었다.

그림 9는 각각 다른 산화시간으로 절연막을 형성한 TMR 소자의 단면을 투과전자현미경(transmission electron microscopy)으로 관찰한 것이다. 그림 9에서 가운데 흰 선이 AlO_x 산화막으로 추정되며 명시야 상에서 밝은 색으로 표시되는 것으로 보아 비정질상으로 판단된다. 산화막 아래쪽

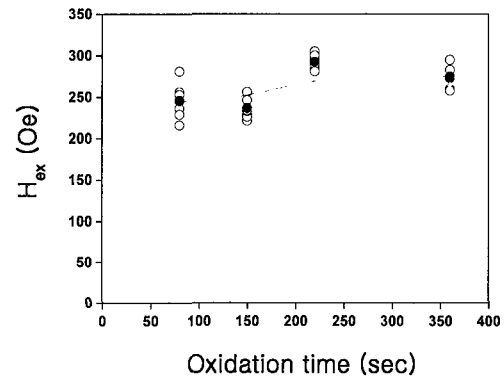


그림 7. 플라즈마 산화시간에 따른 교환자장의 변화 그래프.

Fig. 7. Plots of exchange coupling field as a function of plasma oxidation time.

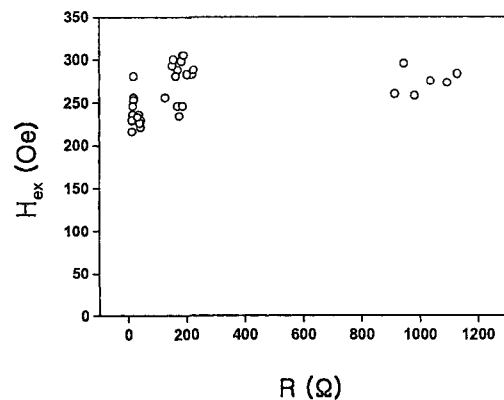
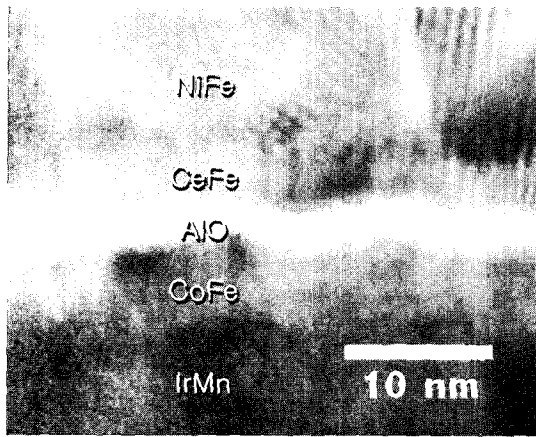


그림 8. 저항에 따른 교환자장의 변화 그래프.

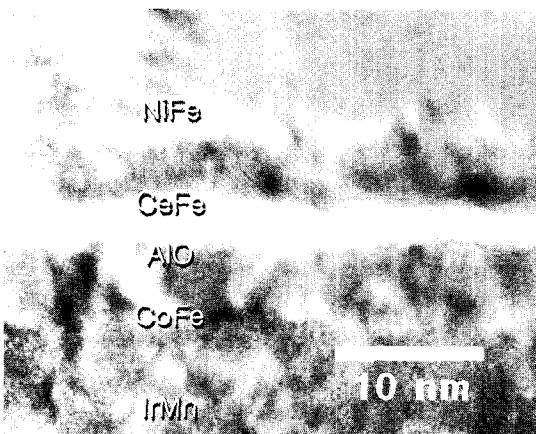
Fig. 8. Plots of exchange coupling field as a function of resistance.

이 하지층(또는 pinned layer)이고, 위쪽이 상부층(또는 free layer)이다. 상하지층 모두 다결정이고, 특히 하지층에서는 반강자성체인 IrMn과 CoFe의 계면을 볼 수 있는데 산화막층과 하부 강자성층의 계면이 하부 CoFe의 성막에 따라 전사되어 있고 그럼에도 불구하고 전체적인 산화막층의 두께는 거의 일정함을 알 수 있었다.

Figure 9의 (a)는 Al을 150 sec 동안 산화시킨 것이고, (b)는 360 sec 동안 산화시킨 것인데, 이미지 분석 소프트웨어를 이용하여 상하부 금속층의 명도가 2배 이상인 부분을 AlO 층이라 가정하여



(a)



(b)

그림 9. 산화시간에 따른 수직단면 TEM 사진.
Fig. 9. TEM cross-sectional views of TMR devices with oxidation time of (a) 150 sec, and (b) 360 sec.

5군데의 AlO 층의 두께를 측정해 본 결과, 150 sec 동안 산화를 행한 경우 두께의 평균이 20.9 Å, 표준편차가 3.9 Å 이었고, 360 sec 동안 산화를 행한 시편의 경우 두께의 평균이 27.5 Å, 표준편차가 6.5 Å임을 알 수 있었다. 즉, 산화시간이 긴 시편의 산화막층이 더 두꺼워졌고, 두께의 편차가 심해졌음을 알 수 있었다. H. Kyung[16]에 의하면 플라즈마 산화법으로 산화막층을 제작할 경우 산화시간이 일정시간 이상 계속되면 산소 공급의 국부적인 불균일로 인해 특정 부위에 산소가 많이 모여들게 되는데 그럼으로 인해 그 부분의 Al 금속 이온이 상대적으로 부족하게 된다. 농도구배를 형성함에 의해 주변의 Al 원자는 산소가 많은 영역으로 다시 이동해 산소원자의 밀도가 높은 영역이 점점 더 많은 산화물을 형성하게 된다. 그럼으로 인해 360 sec 동안 산화를 행한 시편의 산화막층의 두께 편차가 더 심한 것으로 생각되었다. 절연층의 두께 편차가 커진다는 것은 절연층 두께의 편차가 커졌음을 의미하고, 그로 인해 두께가 얇은 부분에서 주로 전자 터널링이 일어나게 되며 실제 터널 배리어로 작용하는 절연층의 면적이 줄어들게 된다[17]. 이런 효과들이 이 실험에서 80 sec 이상의 플라즈마 산화로 인해 과산화된 시편들의 터널자기저항비가 줄어든 원인으로 판단되었다.

4. 결론

스핀밸브 구조를 갖는 터널자기저항소자에서 절연막의 플라즈마 산화시간에 따른 자기저항비 변화를 관찰하였을 때 80 sec의 산화시간에서 측정값 30.31 %, 불균일 전류효과를 고려한 계산값에서 25.18 %의 자기저항비를 보여 80 sec가 가장 적절한 산화시간임을 알 수 있었다.

산화시간이 크게 증가해도 15% 이상의 높은 자기저항비를 보여 ICP 산화법을 이용할 경우 공정 범위가 매우 넓음을 알 수 있었다. 절연막의 플라즈마 산화시간에 따른 자기적 특성을 살펴본 결과 산화시간과 교환결합자장 사이에는 일관된 연관성이 없음을 알 수 있었다. 그러므로 이 실험의 범위 내에서는 하부막의 산화로 반강자성체인 CoO가 생성될 정도로 산화가 진전되지는 않았음을 간접적으로 알 수 있었다. 고분해능투과전자현미경에 의한 수직 단면 구조 관찰 결과 산화시간이 길어짐에 따라 절연층의 두께가 증가할 뿐 아니라 두께의 편차 또한 증가함을 알 수 있었다. 두께와 두께 편차의 이러한 증가가 산화시간 증가에 따른

저항 증가 및 자기저항비 감소의 주된 원인임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호 R01-2000-00236) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 현준원, "CoO / NiO)/ NiFe / Cu / NiFe Spin - Valve 박막에서의 자기저항효과와 자기적 특성에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, Vol. 9, No. 10, p. 1060, 1996.
- [2] 서수정, 김영근, 이성래, "거대 자기저항 소자와 터널 자기저항 소자의 원리와 응용", 전기전자재료학회지, 14권, 5호, p. 3, 2001.
- [3] 이우영, 신경호, "MRAM 기술현황 및 연구동향", 전기전자재료학회지, 13권, 11호, p. 12, 2000.
- [4] M. Julliere, "Tunneling between ferromagnetic films", Phys. Lett., Vol. 54A, p. 225, 1975.
- [5] J. C. Slonczewski, "Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier", Phys. Rev., Vol. B39, p. 6995, 1989.
- [6] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, "Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions", Phys. Rev. Lett., Vol. 74, p. 32736, 1995.
- [7] T. Miyazaki and N. Tezuka, "Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction", J. Magn. Mater., Vol. 139, p. 1231, 1995.
- [8] J. Sugawara, E. Nakashio, S. Kumagai, J. Honda, Y. Ikeda, and T. Miyazaki, "Fabrication of ferromagnetic tunnel junctions with ICP oxidized tunnel barriers", J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 23, No. 4, p. 1281, 1999.
- [9] Young Min Lee and Ohsung Song, "Effect of plasma oxidation time on TMR devices prepared by a ICP sputter", Kor. J. Mater. Res., Vol. 11, No. 10, p. 900, 2001.
- [10] J. S. Moodera, E. F. Gallagher, K. Robinson, and J. Nowak, "Optimum tunnel barrier in ferromagnetic/insulator/ferromagnetic tunneling structures", Appl. Phys. Lett., Vol. 70, p. 3050, 1997.
- [11] J. S. Moodera, L. R. Kinder, J. Nowak, P. LeClair, and R. Meservey, "Geometrically enhanced magnetoresistance in ferromagnet-insulator-ferromagnet tunnel junctions", Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 708, 1996.
- [12] R. J. Pederson and F. L. Vernon, Jr., "Effect of film resistance on low-impedance tunneling measurements", Appl. Phys. Lett., Vol. 10, p. 29, 1967.
- [13] S. J. Byeun, P. K. Park, I. W. Jang, M. S. Youn, J. H. Lee, and K. W. Rhie, "Improvement of substrate and insulating layer of FM/Al₂O₃/FM magnetic tunneling junction and the study of magnetic transport", J. Kor. Magn. Soc., Vol. 9, p. 245, 1999.
- [14] M. F. Gilles, W. Oepts, A. E. T. Kuiper, R. Coehoorn, Y. Tamminga, J. H. M. Snijders, and W. M. Arnold Bik, "The optimum oxidation state of AlO_x magnetic tunnel junctions", IEEE Tran. Magn., Vol. 35, p. 2991, 1999.
- [15] J. S. Moodera and L. R. Kinder, "Ferromagnetic-insulator-ferromagnetic tunneling: spin-dependent tunneling and large magnetoresistance in trilayer junctions", J. Appl. Phys., Vol. 79, p. 4724, 1996.
- [16] H. Kyung, H. S. Ahn, C. S. Yoon, C. K. Kim, Ohsung Song, T. Miyazaki, Y. Ando, and H. Kubota, "Effect of microstructure on the magnetoresistive properties in NiFe/Co(CoFe)/Al(Ta)-oxide/Co(CoFe) tunnel junctions", J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 5, p. 2752, 2001.
- [17] T. E. Clark, F. B. Mancoff, S. X. Wang, B. M. Clemens, and R. Sinclair, "Study of DC plasma oxidized Al₂O₃ barriers in spin dependent tunneling junctions using high resolution transmission electron microscopy", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, p. 2922, 1999.