

ICP 스퍼터를 이용한 TMR 소자 제작에서 절연막의 플라즈마 산화시간에 따른 미세구조 및 자기적 특성 변화

이영민[†] · 송오성
서울시립대학교 재료공학과

Effect of plasma oxidation time on TMR devices prepared by a ICP sputter

Young Min Lee[†], and Ohsung Song

Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743

(2001년 8월 11일 받음, 2001년 10월 8일 최종수정본 받음)

Abstract We prepared 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 has $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ junction area on $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ Si/SiO₂ (1000 Å) substrates by a inductively coupled plasma(ICP) magnetron sputter. We fabricated the insulating layer using a ICP plasma oxidation method by varying oxidation time from 80 sec to 360 sec, and measured resistances and magnetoresistance(MR) ratios of TMR devices. We used a high resolution transmission electron microscope(HRTEM) to investigate microstructural evolution of insulating layer. The average resistance of devices increased from 16.38 Ω to 1018 Ω while MR ratio decreased from 30.31 % (25.18 %) to 15.01 % (14.97 %) as oxidation time increased from 80 sec to 360 sec. The values in brackets are calculated values considering geometry effect. By comparing cross-sectional TEM images of 220 sec and 360 sec-oxidation time, we found that insulating layer of 360 sec-oxidized was 30 % and 40 % greater than that of 150 sec-oxidized in thickness and thickness variation, respectively. Therefore, we assumed that increase of thickness variation with oxidation time is major reason of MR decrease. The resistance of 80 sec-oxidized specimen was $160 \text{ k}\Omega \mu\text{m}^2$ which is appropriate for industrial needs of magnetic random access memory(MRAM) application.

Key words : MRAM, TMR, spin-dependent, magnetoresistance

1. 서 론

TMR (tunneling magneto resistance) 현상은 강자성층/절연층/강자성층 구조를 갖는 박막에서 면에 수직한 방향으로 전류를 흘려주면 양쪽 강자성층의 스핀 배열 상태에 따라 절연층에서의 전자 터널링 확률이 달라짐으로 접합 저항이 변하는 현상으로 1975년 Julliere¹⁾에 의해 처음 발견되었고, 그 후 1989년 Slonczewski²⁾에 의해 수학적으로 이론이 정립되었다. 그러나 당시에는 극저온에서만 자기저항 현상을 보여 그다지 실용성을 갖지 못하다가 1995년 Moodera³⁾가 evaporation 방법을 이용하여 금속 박막을 성막하고 glow discharge 방법으로 절연막을 형성하여 상온에서 18%의 자기저항비를 얻는 데 성공하고, 비슷한 시기에 Miyazaki⁴⁾가 절연막을 대기중에서 산화시키는 방법으로 18%의 상온 자기저항비를 얻는데 성공한 이후 고밀도 하드 디스크의 센서나 비휘발성 메모리인 MRAM에의 응용 등에 큰 가능성을 보여 많은 연구가 이루어지고 있다.

터널자기저항비(TMR)에 영향을 미치는 주요한 요소 중 한가지는 두 강자성층의 분극률이다. Julliere 모델에 의하

면 터널자기저항값은 두 강자성층의 스핀 분극률 P_1, P_2 에만 의존하며 터널자기저항비 $TMR = 2P_1P_2/(1-P_1P_2)$ 로 정의된다. 따라서 강자성층의 분극률을 높이기 위해 여러 가지 금속이 시도되었으며, 현재까지는 CoFe가 액체헬륨 온도에서 약 50%의 분극률을 보여 TMR 소자에 가장 적합한 것으로 알려져 있다.^{5,6)}

그러나 실제로 스핀 의존성 터널링 현상은 절연층의 특성에 크게 의존한다. 즉, 절연층의 두께나 비저항 등이 중요한 요소로 작용하게 된다. 그러므로 높은 자기저항비를 얻기 위해서는 가능한 얇은 두께에서도 우수한 절연특성을 가지고 핀홀(pin-hole) 등이 존재하지 않도록 치밀하고 균일한 구조를 갖는 절연층의 제작이 필수적이다.

현재 절연층으로는 열역학적인 안정성이 높고 우수한 절연특성을 갖는 Al₂O₃가 일반적으로 사용되고 있다. 그 제조 방법으로는 자성막 위에 우선 스퍼터를 이용하여 Al 금속을 증착시킨 후에 대기중에서 산화시키는 자연산화법과^{4,7)} 산소 플라즈마를 이용하여 산화시키는 플라즈마 산화법이^{5,8)} 주로 이용되고 있다. 플라즈마 산화법의 경우는 산화 조건을 임의로 조절할 수 있기 때문에 산소분압, 산화시간,

[†] E-mail: e0min@sidae.uos.ac.kr

플라즈마 출력 등의 최적 조건 확립이 매우 중요하다.^{9,10)}

지금까지 보고된 바로는 Moodera⁹⁾에 의하면 70mTorr의 산소분압에서 DC voltage 18.KV, 산화시간이 110 sec 이고 Al의 두께가 10~16 Å일 때 가장 높은 자기저항비를 나타내었고 Sato¹⁰⁾의 경우는 산소, 아르곤 혼합기체의 압력이 0.5 Pa, RF power 0.01W/cm², Al 두께가 13 Å 이고 산화시간이 100~500 sec일 때 가장 높은 자기저항비를 나타내었다고 보고되었다.

TMR 소자가 상업적으로 사용되기 위해서는 높은 재현성과 수명이 보장되어야 하는데, Moodera 등이³⁾ 최초로 시도한 강자성층/절연층/강자성층 형태를 사용하고 두 강자성층의 보자력을 달리하여 같은 자장에서의 스핀 배열을 달리한 구조의 TMR 소자는 자화반전 거동이 반복될수록 자기저항비가 감소하는 문제가 있다. 반면에 Parkin¹¹⁾ 등은 두 강자성층을 보자력이 같은 금속을 사용하고 한쪽 강자성층을 반강자성체로 고정시키는 방법을 사용하였는데 이럴 경우 10⁷번 이상의 자화반전이 반복되어도 안정하게 유지되었고 재현성도 큰 TMR 소자를 만들어 낼 수 있었다.

유도결합플라즈마(ICP : inductively coupled plasma)는 코일에 고주파전류를 흘려줌에 의해 플라즈마를 발생시키는데, 저압력, 고평라즈마밀도, 저플라즈마전위 등의 특징을 갖는다. 또한 기판을 부유전위로 하면 국부적으로 이온이 끌려들어가는 일이 없어 플라즈마 산화법에서 문제가 되는 기판의 플라즈마 손상¹²⁾을 방지하여 대기중 기판에서의 균일한 성막 및 산화에 적합한 장비라고 알려져 있다. ICP 플라즈마 산화법은 대기중산화나 종래의 산화방법에 비해서 재현성이 좋고 분산이 적은 것으로 알려져 있으며 터널 장벽층의 제작방법중 하나로 유효한 것으로 보고되어 있다.¹³⁾

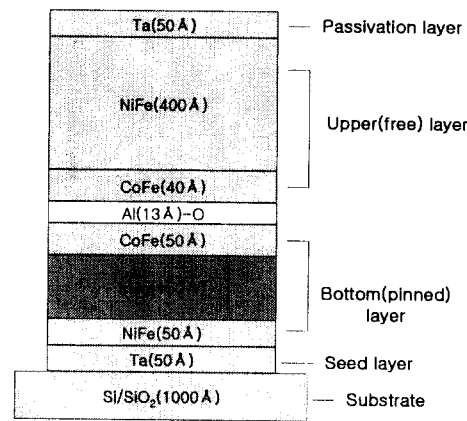
본 연구에서는 반 강자성체를 이용하여 강자성층 중 한쪽을 고정시킨 Ta/NiFe/IrMn/CoFe/AlO/CoFe/NiFe/Ta 구조의 TMR 소자를 제작하고 소자 제작에 있어서 중요한 변수가 되는 산화막 형성 공정 중 플라즈마 산화시간을 달리하여 이때의 절연막층의 미세구조 변화가 TMR 소자 특성에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

2. 실험 방법

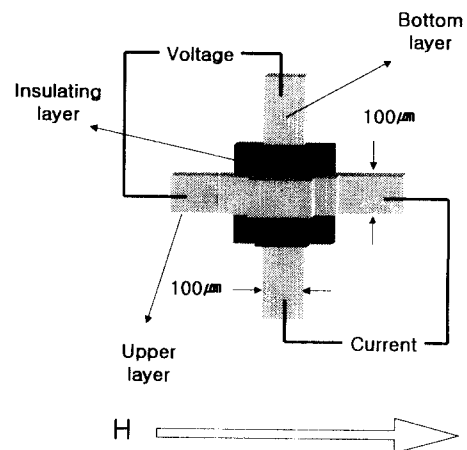
2.1. 시편의 제작

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 이물질들을 제거하기 위해 먼저 아세톤에 담그어 30분간 초음파 세척을 행한 후 약 70 °C의 에탄올로 세척하였다.

메탈 마스크를 사용하여 Fig. 1 (a), (b)와 같은 형태로 수직구조는 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)의 형태이고 선폭 100 μm의 십자형 junction을 만들었다. 하부막을 형성한 후와 산화막을 형성한 후 마스크를 바



(a)



(b)

Fig. 1. Schematic illustration of a sample : (a) cross-sectional view of a junction and (b) top view of a junction.

꾸기 위해 총 2번 시편을 대기중에 노출시켰으며 junction area는 모든 시편을 100 μm×100 μm로 고정하였다.

ICP (inductive coupled plasma) 지원 마그네트론 스퍼터링으로 각 층을 만들고 Al을 산화시킴으로 산화막을 형성하여 상기 구조를 갖는 TMR 소자를 제작하였다.

이 실험에서 사용한 ICP 마그네트론 스퍼터의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 실험에서 사용한 스퍼터는 크게 load lock 역할을 하는 시편준비실과 플라즈마 산화전용실, 자성막형성실 3개의 챔버로 이루어져 있다. 각 챔버는 터보 분자 펌프를 사용하여 10⁻⁵~10⁻⁶ Pa 이하의 고진공을 얻을 수 있도록 제작되었다. 산화실과 자성막형성실 모두 ICP 플라즈마를 일으킬 수 있도록 되어 있다. 자성막형성실에는 6개의 건이 설치되어 시편을 옮기지 않고 박막을 형성할 수 있게 되어 있으며 시편이 1 rev/sec의 속도로 회전하여 기판전면에 균일하게 박막이 성막되도록 설계되었다. 전처리가 끝난 기판을 시편준비실(sample preparation chamber)에 위치시킨 후 3.0×10⁻⁵ Pa의 압력이 될 때까지 진공으로 만든 후 자성막형성실(Ferromagnet

Table 1. Sputtering condition of the each layer.

Layer	depo. rate (Å/sec)	Ar flow (sccm)	Pressure (Pa)	Power (target/W)	Power (coil/W)
Ta	0.5524	2.1	0.078	150	20
NiFe	0.6681	2.1	0.078	150	20
CoFe	0.4425	2.8	0.107	150	20
IrMn	0.7771	2.1	0.080	150	20
Al	0.8813	0.7	0.078	150	20

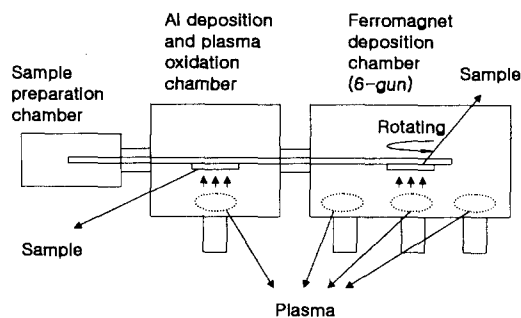


Fig. 2. Schematic illustration of the ICP magnetron sputter.

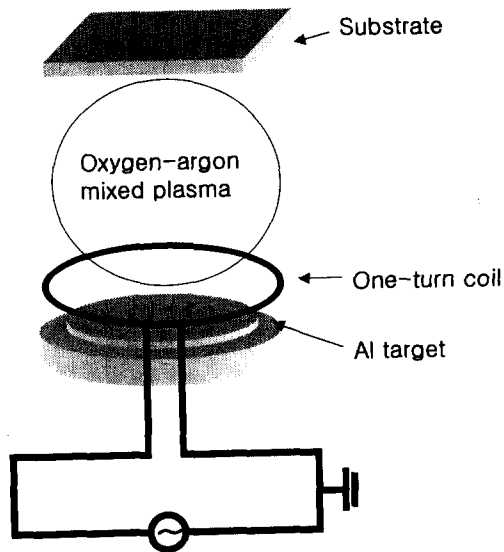


Fig. 3. Schematic illustration of the ICP oxidation.

deposition chamber)로 옮겼다. 자성막형성실에서 3.0×10^{-6} Pa의 진공으로 만든 후 하부막을 형성하고 다시 대기중으로 꺼내어 메탈 마스크를 교환하고 다시 산화실(Al deposition chamber)로 옮긴 후 1.4×10^{-5} Pa의 진공으로 만들고 Al을 증착 한 후 산소를 흘려주어 산소 플라즈마로 산화를 시켰다. 다시 대기중으로 꺼내어 마지막 마스크로 교환하고 같은 순서대로 자성막형성실에서 상부막을 형성하였다.

강자성층을 증착시킬 때는 100 Oe의 자장을 자화용이축 방향으로 인가하면서 스퍼터링을 행하였다. 산화막층은 Al을 13 Å 두께로 증착시킨 후에 플라즈마 산화법으로 산화

시켰다. 스퍼터링은 챔버를 3.0×10^{-6} Pa 이하의 고진공으로 만든 후에 Ar을 흘려주어 행하였고 각 층마다의 스퍼터링 조건은 Table 1과 같이 진행되었다.

하부막을 형성한 후 Al을 증착하고 그 Al 층을 산화시키기 위해 플라즈마 산화법을 사용하였다. Al증착과 산화는 자성막과는 다른 산화전용챔버내에서 행하여졌으며 1.4×10^{-5} Pa의 진공으로 만든 후 Ar을 흘려주어 Al을 13 Å 두께로 증착하고 그 후에 산소를 일정량 흘려주어 플라즈마 산화를 실시하였다. 플라즈마 산화시 세부공정 조건은 O₂의 유량이 9.1 sccm, Ar의 유량이 4.0 sccm이 되게 하여 O₂의 분압은 0.4 Pa, Ar의 분압은 0.7 Pa이 되게 하였고, coil의 power는 100 W, target의 power는 15 W로 유지하였다. 절연막층(Al)의 산화시간은 산화시간에 따른 TMR 소자의 성질을 알아보기 위하여 80, 150, 220, 360 sec의 4가지로 달리하면서 절연층을 만들고 이후의 성막은 같은 조건으로 진행하였다. Fig. 3에 ICP를 이용한 플라즈마 산화법의 개략도를 나타내었다. cathode 위에 위치한 코일에 RF 전류를 흘려줌으로 유도결합플라즈마를 발생시켜 기판전면에서 고른 산화가 일어나도록 하였다.

2.2. 전기적·자기적 물성 분석

Fig. 4(a)와 같이 직류 4단자법을 사용하여 완성된 십자형 시편의 MR비와 저항을 측정하였다. 하지층 한쪽과 상부층 한쪽을 연결하여 전류를 흘려주고 또 다른 한쪽에서 전압을 측정하는 방법으로 저항을 측정하였다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 십자형의 소자측정을 위하여 4개의 터미널을 한 개의 미세측에 의하여 고정시킨 four-point probe를 사용하여 Fig. 1(b)에 나타난 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 하였다.

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

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

2.3. 투과전자현미경을 이용한 미세구조분석

절연막층의 산화시간을 달리한 TMR 소자의 수직 단면을 고분해능투과전자현미경(HRTEM)으로 관찰하였다. 수

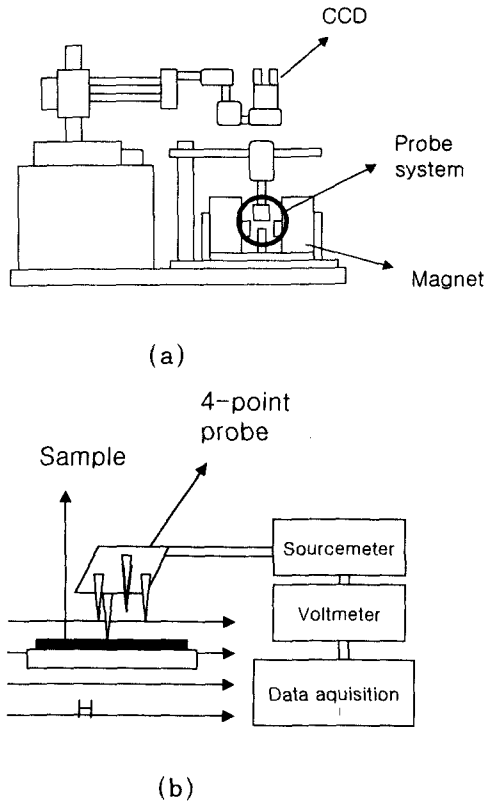


Fig. 4. Schematic illustration of (a) a MR measurement system and (b) probe system.

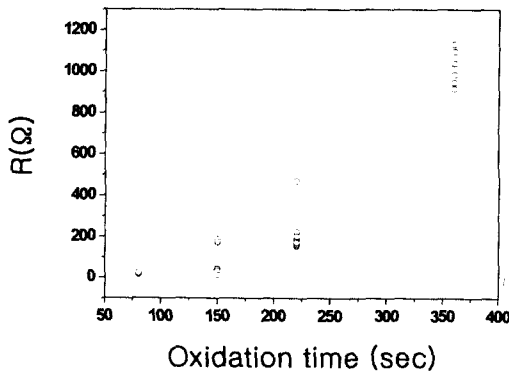


Fig. 5. Resistances of each sample.

직단면 투과전자현미경 관찰을 위한 단면시편은 메탈마스크를 사용하지 않고 적층구조는 동일하게 하여 제작하였다. HRTEM 관찰을 위해 준비된 시편조각을 성막면을 맞대어 2개씩 붙여 Mo 튜브에 넣고 에폭시로 고정시킨 후 다이아몬드 절단기로 절단하고 약 20 μm 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. 실험 결과

Fig. 5는 각각 80, 150, 220 sec 및 360 sec 동안 Al을 산화시켜 절연막을 형성한 TMR 소자의 저항을 표시한 것이다. 각 시편들의 평균 기준저항은 11.49, 65.07, 178.8, 771.1 Ω으로 산화시간이 증가함에 따라 기준저항은 지수함수적으로 크게 증가하였다. 이는 산화시간을 적게 하였을 경우에는 Al의 산화가 충분히 이루어지지 않는데 비해 산화시간을 길게 함에 따라 Al의 산화가 완전히 이루어지고, 그 시간이 지나칠 경우에는 Al이 과산화될 뿐 아니라 하부 자성막까지 일부 산화가 이루어지기 때문에 저항이 증가하게 되는 것으로 판단되었다.⁹⁾

Fig. 6은 Al층의 산화시간에 따른 자기저항비의 분포를 나타낸 그림이다. 산화시간이 증가할수록 자기저항비가 계속 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이것은 이미 80 sec의 산화시간이 가장 적절한 산화시간이거나 또는 그 이상이라고 생각할 수 있다. 지금까지의 보고에 의하면⁹⁾ 통상 특정한 산화시간에서 최대 MR비를 보이고 그 이하나 그 이상의 산화시간에서는 MR비가 줄어드는 경향을 보였는데 이러한 사실에 근거하여 볼 때 상기 data에서는 geometry effect를 고려해 볼 필요가 있다. Geometry effect란 본 실험과 같이 접합 면적이 100 μm × 100 μm 정도 되는 경우에 4단자법으로 측정을 할 때 실제 전류가 지나게 되는 접합의 모서리부근 불균일한 전류가 흐르게 되고 TMR이 ΔR/R_m으로 정의되므로 최소저항 R_m이 작아져서 상대적으로 TMR값이 크게 측정되는 오류가 발생하는 현상이다.¹⁴⁾ R. J. Pederson¹⁵⁾의 모델 의하면 전극저항 R 및 실제 터널저항 RT의 관계에서 geometry effect에 의한 측정 저항 R_m은

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

로 주어져서 상기식에 의하면 극단적인 경우 RT가 (-) 부호를 갖게 된다. 여기서 R은 전극의 저항이고 R_T는 실제 저항, R_m은 측정되는 겉보기 저항이다. 이러한 배경에 근거하여 측정된 실험에서 R_T를 고려하고 각각의 실제 R_m을 측정된 계산을 Table 3에 나타내었다. 여기에서 전극저항 R은 상하지층 모두 평균 10 Ω이었다.

Table 2. Resistance and MR ratio of each sample.

	80 sec	150 sec	220 sec	360 sec
Ave. R(Ω)	16.38	86.73	210.7	1018
Max. R(Ω)	19.1	188	468	1130
Ave. MR(%)	30.31	22.79	18.13	15.01
Max. MR(%)	31.8	25.6	18.7	15.9

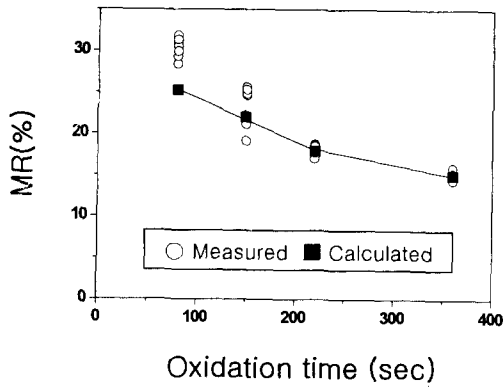


Fig. 6. MR ratios of each sample, O measured MR and ■ calculated MR with subtracting geometry effect.

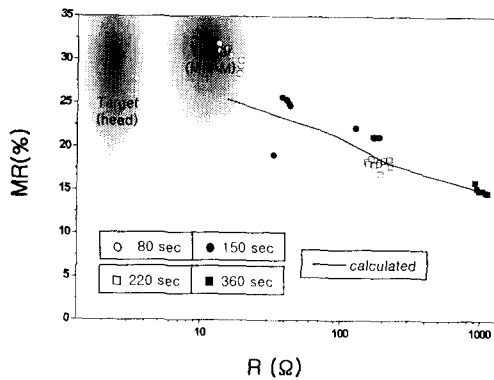


Fig. 7. MR ratio as a function of the resistance(O oxidation time of 80n sec, ● 150 sec, □ 220 sec, and ■ 360 sec). The solid line is calculated MR-R data considering geometry effect.

즉 80 sec 동안 산화를 행한 시편의 MR비가 30%로 측정되었는데 geometry effect에 의해 실제보다 증가되어 측정된 값으로 판단하여 역으로 계산을 해보면 실제 MR비는 25%일 것으로 예상할 수 있었다. Fig. 6의 점은 사각형이 geometry effect를 고려한 실제 MR비로, geometry effect를 고려하여도 본 실험범위에서는 geometry 효과가 최대 16 % 정도 영향을 미쳤고, geometry effect를 배제하여 순수하게 80 sec까지는 산화시간이 줄어들어 따라 MR비가 증가함을 알 수 있다.

본 실험과 같이 산화시간이 길어질수록 자기저항비가 낮아지는 원인으로는, Moodera⁹⁾에 의하면 하부 자성막의 일부가 산화될 경우 CoO 또는 FeO가 형성되어 이런 산화물 질들이 결합으로 작용하여 그곳에서 전자의 스핀 산란이 일어나게 된다. 그럴 경우 원래의 스핀 정보를 가지고 있던 전자들의 스핀 정보가 소실됨에 의해 자기저항비의 감소가 생기는 것으로 보고된 결과와 일치하고 있다.

Fig. 7에 4가지 시편의 저항 영역대 자기저항비의 관계를 표시해 보았다. Geometry effect를 고려한 실제 MR비는 직선으로 표시하였다. 저항 축을 로그스케일로 하였을 경우 선형적인 관계를 보이고 있다. 상업적으로 사용 가능한 HDD용 헤드와 MRAM용 기억소자로 쓰일 TMR소자의 요구 영역을 그래프에 표시해 보았다.¹⁶⁾ 이 실험에서 80 sec 동안 산화를 행한 시편의 경우 평균 저항이 16.38 Ω 이었으나 이 실험에서의 junction 면적이 10,000 μm²이므로 1μm²당 저항은 163,800 Ω으로 head용으로 쓰기에는 상당히 높은 수치임을 알 수 있었다. 접합면적의 변화에 따라 비저항값이 달라지지 않는다고 가정할 경우에 MRAM에 사용되는 TMR소자의 요구 영역에는 어느 정도 만족하는 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 산화 시간에 따른 시편들은 전형적인 TMR 소자의 자장-저항 그래프를 나타내고 있다. H_{ex}가 80 sec의 산화시간에서 최소 220 Oe 인데 220 sec의 산화시간에서 최대 310 Oe까지 커졌음을 알 수 있었다. 산화시간이 긴 시편의 경우 하지층의 Co가 산화되어 CoO가 생성될 경우 CoO가 반강자성체이므로 H_{ex}가 산화시간에 비례하여 증가할 것으로 예상되었으나 산화시간의 증가에 따라 H_{ex}도 일정하게 증가하는 양상은 보이지 않았다. 그러므로 이 실험의 산화시간 범위내에서는 H_{ex}가 산화시간에 비례하여 증가할 만큼 CoO의 생성이 이루어지지 않았음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 각각 다른 산화시간으로 절연막을 형성한 TMR 소자의 단면을 고분해능투과현미경(High resolution transmission electron microscopy)으로 관찰한 것이다.

Fig. 9에서 가운데 흰 선이 AlO_x 산화막으로 추정되며 명시야 상에서 밝은 색으로 표시되는 것으로 보아 비정질 상으로 판단된다. 산화막 아래쪽이 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.

Fig. 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 5군데의 AlO 층의 두께를 측정해 본 결과 150 sec 동안 산화를 행한 경우 두께의 평균이 2.09 nm, 표준편차가 0.39 nm 였고, 360 sec 동안 산화를 행한 시편의 경우 두께의 평균이 2.75 nm 표준편차가

Table 3. Resistance and MR ratio of each sample considering geometry effect.

	80 sec		150 sec		220 sec		360 sec	
	Measured	True	Measured	True	Measured	True	Measured	True
R _{min} (Ω)	16.38	19.74	86.73	90.07	210.7	214.0	1018	1021
R _{max} (Ω)	21.35	24.71	106.5	109.84	249.0	252.3	1171	1174
MR(%)	30.31	25.18	22.79	21.95	18.13	17.88	15.01	14.97

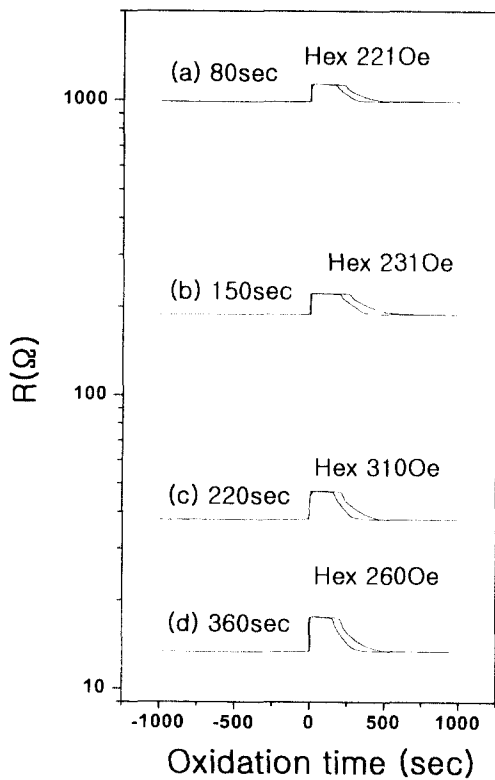


Fig. 8. MR curves of each sample.

0.65 nm 임을 알 수 있었다. 즉 산화시간이 긴 시편의 산화막층이 더 두꺼워졌고 두께의 편차가 심해졌음을 알 수 있었다. H. Kyung¹⁷⁾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 되고 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.

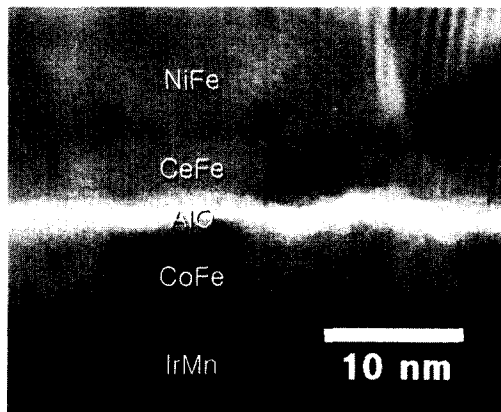
Al의 산화를 80 sec 이상 진행한 공정에서 산화시간의

증가에 따라 선형적으로 자기저항비가 줄어들었으므로 150 sec와 360 sec의 산화시간은 이미 가장 적절한 산화시간을 넘어선 것이며, Al과 O가 stoichiometry하게 결합할 수 있는 조성보다 산소가 더 많을 것으로 예측할 수 있었다. 그런데 360 sec 동안 산화시킨 Fig. 9의 (b) 사진은 산화막층의 두께가 더 두껍게 관찰되므로 Al의 산화가 지나치게 진행되고 하부의 강자성층까지 상당량 산화가 진행되었을 것으로 판단되었다.

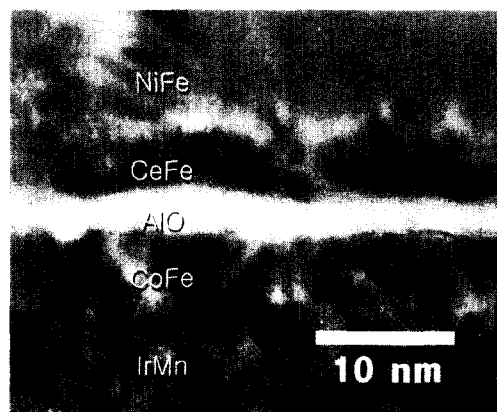
4. 결과 및 고찰

균일성이 우수한 ICP 스퍼터를 이용하여 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 의 집합크기를 가진 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) 구조의 TMR 소자를 만들고 절연막층의 플라즈마 산화시간을 달리하여 플라즈마 산화시간에 따른 TMR 소자의 특성을 알아보고자 하였다.

산화시간이 80 sec에서 360 sec으로 증가함에 따라 저항의 평균은 16.38 Ω에서 1018 Ω까지 증가하였고 자기저항비는 30.31 %에서 15.01 %로 감소하였다. Geometry effect를 고려하였을 경우 80 sec에서의 MR비는 25.18%로, 미세가공으로 수 μm 이내의 집합면적으로 가지는 TMR 소자가 아니라도 수치계산에 의해 간접적으로 geometry effect를 고려한 실제 MR비를 측정함이 유효한 것으로 생각되었다. HRTEM을 사용한 소자의 수직단면 미세구조 관찰에서는 360 sec로 산화시간이 긴 시편이 산화시간이 220 sec인 시편보다 산화막의 두께는 30%, 편차가는 40% 정도 증가하였음을 확인하였고, 산화시간에 따라 두께의 편차가 커진 것이 자기저항비가 감소한 주요한 원인으로 추정되었다. 전체적으로 저항이 증가하면서 자기저항비가 감소하는 경향을 보였는데, 80 sec 동안 산화를 행한 시편의 저항이 $160 \text{ k}\Omega/\mu\text{m}^2$ 으로 MRAM용 TMR 소자에 근접한 조건을 나타내었고 상용화 목적을 위해서는 산화시간을 더욱 작게 하여 기준저항을 줄이고 MR비는 향상시키는 것이 유리할 것으로 예상되었다.



(a)



(b)

Fig. 9. HRTEM cross-sectional view of TMR devices oxidation time of (a) 150 sec, (b) 360 sec

감사의 글

본 연구는 테라급나노소자개발사업단의 테라급나노소자 개발사업 (과제번호M101KC010001-01K030100000) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. M. Julliere, Phys. Lett., **54A**, 225 (1975).
2. J. C. Slonczewski, Phys. Rev. **B39**, 6995 (1989).
3. J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, Phys. Rev. Lett., **74**, 3273 (1995).
4. T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Magn. Mater., **139**, L231 (1995).
5. W. J. Gallagher, S. S. P. Parkin, Yu. Lu, X. P. Bian, Am Marley, K. P. R. A. Altman, S. A. Rishton, C. Jahres, T. M. Shaw and Gang Xiao, J. Appl. Phys., **81**, 3741 (1997).
6. J. S. Moodera, G. Mathon, J. Magn. Magn. Mater., **200**, 248 (1999)
7. P. K. Wong, J. E. Evetts and M. G. Blamire, J. Appl. Phys., **83**, 6697 (1998).
8. J. S. Moodera, L. R. Kinder, J. Appl. Phys., **79**, 4724 (1996).
9. J. S. Moodera, E. F. Gallagher, K. Robinson and J. Nowak, Appl. Phys. Lett., **70**, 3050 (1997).
10. M. Sato, H. Kikuchi and K. Kobayashi, J. Appl. Phys., **83**, 6691 (1998).
11. S. Gider, B. U. Runge, A. C. Marley and S. S. P. Parkin, Science, **281**, 797 (1998).
12. J. Appl. Phys., K. P. Cheung and C. P. Chang **75** (9), 4415 (1994).
13. J. Sugawara, E. Nakashio, S. Kumagai, J. Honda, Y. Ikeda, T. Miyazaki, J. Magn. Soc. Jpn., **23** (4), 1281 (1999).
14. J. S. Moodera, L. R. Kinder, J. Nowak, P. LeClair, and R. Meservey, Appl. Phys. Lett. **69** (5), 708 (1996).
15. R. J. Pederson and F. L. Vernon, Jr., Appl. Phys. Lett. **10**, 29 (1967).
16. T. Miyazaki, J. Magn. Soc. Jap., **25** (4), 471 (2001).
17. H. Kyung, H. S. Ahn, C. S. Yoon, C. K. Kim, Ohsung Song, T. Miyazaki, Y. Ando, and H. Kubota, J. Appl. Phys., **89** (5), 2752 (2001).