

Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 투과자기저항 특성 연구

Tunneling Magnetoresistance in Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co Thin Films

현준원*, 백주열**

(June-Won Hyun*, Ju-Yeoul Baek**)

Abstract

Magnetic properties were investigated for Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(t)/Co(200 Å) junction related with the parameters of Al₂O₃. Insulating Al₂O₃ layer was formed by depositing a 5~40 Å thick Al layer, followed by a 90~120 s RF plasma oxidation in an O₂ atmosphere. Magnetoresistance was not observed for tunnel junction with 5~10 Å thick Al layer, but magnetoresistance was observed large for tunnel junction with 15~40 Å thick Al layer. Oxidation time did not largely influence magnetoresistance. Tunnel magnetoresistance effect depended on magnetization behavior of two ferromagnetic layers. Tunneling junction was confirmed through nonlinear I-V curve. In this work, tunneling magnetoresistance(TMR) up to 30 % was observed. This apparent TMR is an artifact of the nonuniform current flow over the junction in the cross geometry of the electrodes.

Key Words : tunneling magnetoresistance(TMR), I-V curve, insulating barrier, RF plasma oxidation, tunnel junction, magnetization, nonuniform current flow

1. 서 론

TMR(Tunneling magnetoresistance)현상은 자기저항효과를 나타내는 강자성층/부도체층/강자성층 구조의 터널접합막에서 나타난다. 이것은 기록매체에 담긴 정보를 종전보다 훨씬 높은 감도로 읽어내는 차세대 HDD(Hard Disk Drive)의 헤드로 주목받고 있으며, 선진국을 중심으로 이미 상용화 작업이 진행 중이다. 이 현상은 1975년 M. Julliere에 의해

Fe/GeO/Co 접합에서 처음 발견되었으며, 4.2 K이하의 온도에서 약 14 %의 전기전도도의 변화 ($\Delta G/G$)를 관찰한 것이 그 시초이다[1]. 이후 연구결과의 대부분은 4.2 K이하에서의 실험이었고, 저항변화율($\Delta R/R$)은 1~7 %를 보였다[2,3]. 1994년 일본의 연구자들에 의해 실온에서 18 %의 저항변화율을 나타내는 TMR막이 제작되면서[4] 차세대 고밀도 HDD의 헤드로 주목받으며 연구에 활기를 띄게 되었다. TMR막에서 저항의 변화는 외부자장(H_a)의 변화에 따른 두 자성층의 상대적인 자화(M)의 방향에 기인한 스핀-의존 투과현상에 의한 것이다. 두 자성층은 서로 다른 보자력(H_c)을 가진 물질이 요구되며, 두 자성층 사이의 부도체층은 터널링 장벽의 높이를 결정하고 또한, 두께 및 비저항 등의 물성이 자기저항비에 영향을 주는 것으로 알려져 있으므로[5] 매우 얇은 두께에서도

* : 단국대학교 자연과학부
(서울시 용산구 한남동 산8,
Fax : 02-793-0176
E-mail : jwhyun@dankook.ac.kr)

** : 단국대학교 첨단과학부
2001년 7월 5일 접수, 2001년 8월 3일 1차심사완료
2001년 9월 12일 2차심사완료, 2001년 9월 28일 3차
심사완료

핀홀(pin-hole)등의 결함이 없고 우수한 절연특성을 가진 물질이 요구된다. 부도체층은 높은 열역학적 안정성 및 우수한 절연특성을 가진 Al_2O_3 가 주로 쓰이며, 때때로 MgO 나 CoO 등의 물질이 쓰이기도 한다[6,7]. 부도체층을 형성시키는 방법은 터널접합의 특성을 좌우하기 때문에 금속층을 공기 중에서 산화시키는 방법[8], 금속층을 산소 플라즈마에 노출시켜 산화시키는 방법[9] 및 RF 스퍼터링법으로 부도체층을 직접 형성시키는 방법[10] 등이 시도되어 왔으며, 최근에는 AFM(Atomic Force Microscopy)을 이용한 나노 산화기술까지 이용하고 있다[11]. 본 연구에서는 편평도의 향상과 누설전류효과의 억제를 위하여 일반적으로 쓰이고 있는 Si wafer(100) 위에 SiO_2 를 형성시킨 기판을 사용하여 TMR 접합의 기본구조인 $NiFe(300 \text{ \AA})/Al_2O_3(t)/Co(200 \text{ \AA})$ 터널접합을 제작하였다. $NiFe$ 와 Co 는 보자력이 서로 다르기 때문에 쉽게 자화의 반 평행한 상태를 얻을 수 있다. 또한 Si wafer위에 SiO_2 를 형성시킴으로써 기판과 자성체층 사이의 용성접촉을 막고 편평도를 향상시켰다. $NiFe$ 층과 Co 층의 두께를 고정시키고, Al 층의 두께와 산화시간을 변화시켜 부도체층의 변화에 따른 자기저항비의 변화를 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 기판의 전처리

TMR막에서의 표면 거칠기는 편평한 부도체층의 형성에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 Si(100) 기판을 사용하였다[12,13]. 일반적으로 글래스, 코닝글래스(Corning 7059) 등과 비교할 때 실리콘 기판의 표면이 훨씬 편평하다. Si wafer 위에 직접 금속층을 증착할 경우 기판을 통해 누설전류가 발생한다. Si wafer는 수십 Å의 자연산화막이 형성되어있지만 자성체층을 스퍼터 증착할 경우 wafer와 용성접촉이 이루어지기 때문에 일반적으로 많이 사용되고 있는 열산화법을 통해 기판에 SiO_2 층을 형성하였다. 이때의 SiO_2 층의 성장조건은 그림 1과 같다. 처음 5분 동안의 건식산화는 실리콘 표면과 산화막의 부착력을 개선시키며, 10분 동안의 습식산화에 의해 빠르게 성장된다. 그 후 30분 동안 건식산화를 시킴으로써 산화막 표면의 편평도를 향상시켰으며, 일반 Si wafer의 편평도보다 SiO_2 층을 형성시킨 기판의 편평도가 더욱 우수함을 AFM으로 확인하였다. 편광해석법

(ellipsometer)에 의해 성장된 SiO_2 의 두께는 2600 ~ 2700 Å로 측정되었으며, 이때 누설전류 효과는 관찰되지 않았다.

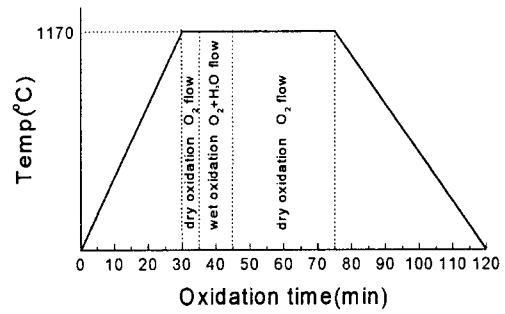


그림 1. SiO_2 층의 성장조건.

Fig. 1. SiO_2 film growth process.

2.2 Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 제작조건

시편은 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 300 Oe의 자장을 가하면서 제작하였다. 시편의 모양은 십자형으로 두 자성층이 교차하도록 만들고, 그 사이에 부도체층을 끼워넣은 형태이다. 완성된 시편의 모양을 그림 2에 나타내었다. 각 층은 서로 다른 마스크를 이용하여 증착되었고, 마스크를 바꿀 때마다 진공의 파기가 있었다. 막대모양의 마스크의 폭은 0.2 mm, 원모양의 마스크의 지름은 5 mm였고, 접합면적은 0.2 mm×0.2 mm였다.

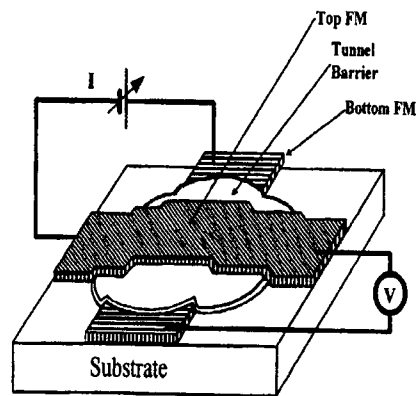


그림 2. 시편의 모양.

Fig. 2. Schematic diagram of junction structure.

표 1. 시편의 제작조건.

Table 1. Conditions of sample preparation.

Base Pressure		$\leq 2.0 \times 10^{-6}$ Torr	Thickness	NiFe	300 Å
Ar Pressure	NiFe	13 sccm, ~0.4 mTorr		Co	200 Å
	Co	14 sccm, ~0.5 mTorr		Al	5 Å ~ 40 Å
	Al	14 sccm, ~0.5 mTorr	O ₂ Pressure		100 sccm, ~0.2 Torr
Deposition Rate	NiFe	~0.2 Å/s	Oxidation Time in Oxygen Plasma		90 sec. ~ 210 sec.
	Co	~0.3 Å/s	Oxygen Plasma Power		30 W
	Al	~0.5 Å/s	Sub.-Target Distance		10 cm

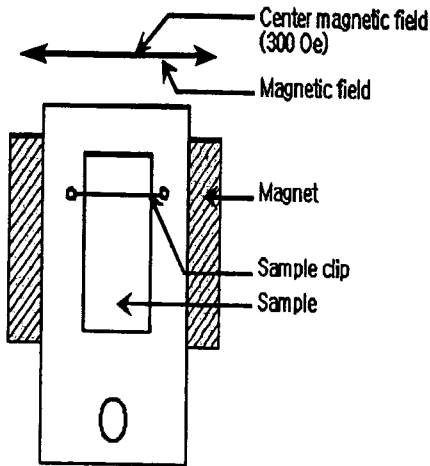


그림 3. 시편 홀더의 모양.

Fig. 3. Schematic diagram of substrate holder.

기판은 Si(100)을 사용하였고, 누설전류효과와 최소화 및 표면 거칠기의 최소화를 위해 전처리를 통해 일반 Si기판의 표면을 산화시킨 Si/SiO₂를 사용하였다. 각 층의 두께는 NiFe 300 Å/Al₂O₃ 5 Å ~ 40 Å/Co 200 Å이었다. 사용한 NiFe 타겟의 조성비는 자왜현상(Magnetostriction)을 보이지 않는 Ni₈₁Fe₁₉였다. 초기 진공도는 2×10^{-6} Torr 였고, 부도체층의 형성방법은 산소 플라즈마법을 이용하였다. 박막제작시 이방성을 주기 위하여 그림 3과 같이 영구자석을 사용하여 홀더를 만들었고,

이때 홀더 중앙의 자장의 세기는 약 300 Oe이었다. 산소 플라즈마로 부도체층을 형성시킬 때 산소는 100 sccm으로 유입시켰으며, 이때의 압력은 0.2 Torr 였다. 플라즈마에 노출시킨 시간은 90초~210 초까지 변화시켰고, 부도체층의 두께에 따른 변화는 5 Å부터 40 Å까지 5 Å 간격으로 조사되었다. 표 1에 박막의 제작조건을 나타내었다. 각층의 아른 압력과 증착속도가 다른 이유는 각 물질의 최적조건이 다르기 때문이다.

2.3 Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 특성측정

자기저항비는 그림 4와 같이 자체 제작한 자기저항측정 장치를 이용하였다. 사용된 기기는 멀티미터(multimeter, HP34401A)를 사용하여 4단자법으로 측정하였다. 노이즈를 방지하기 위해 꼬아진 구리선을 시편의 각 자성체 끝에 인덱스로 연결하였으며, 왼쪽 자성체층에 바닥층에서 윗층으로 전류가 흐르도록 하면서, 다른 두 곳에서 출력전압을 측정하여 저항을 구했다. 측정시 이방성을 주기위해 시편 홀더의 영구자석으로 가해준 자기장의 방향과 같은 방향으로 외부자기장을 인가하였다. 이때 자기장은 -300 Oe에서부터 +300 Oe까지 변화시켰다.

접합의 M-H특성을 관찰하기 위해VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하였고, 전류-전압 특성(I-V curve)은 자기저항비를 측정할 4단자법

과 같은 방법으로 측정하였다.

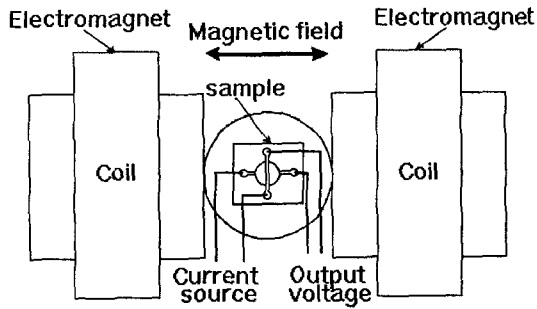


그림 4. 자기저항 측정장치.

Fig. 4. Schematic diagram of the magnetoresistance measurement system.

3. 결과 및 토의

3.1 부도체층의 두께에 따른 자기저항비

그림 5에 알루미늄 박막의 산화시간에 따른 저항의 변화율을 나타내었다. 측정방법은 Si/SiO₂/Al(100 Å)막의 면저항을 4-단자법으로 진공 중에서 산화되는 시간에 따라 연속적으로 측정하였다. 이때 초기 저항값은 0.3512Ω이었다. Si/SiO₂/Al(100 Å)을 30 W의 power로 산화시켰을 때 Al 박막의 저항은 초기 산화에서는 급격한 증가를 보였으나 일정시간이 경과하면서 포화되는 양상을 보였다. 이것은 일정깊이로 산소침투가 산화시간에 따라 증가하지만 일정 시간이 지난 후에는 산화층의 산소포화도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

그림 6은 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(t)/Co(200 Å) 각각의 구조에서의 자기저항비 곡선이다. Al층의 두께 변화에 따른 자기저항비를 관찰하기 위하여 NiFe와 Co층의 두께를 고정시키고 Al층의 두께를 5~40 Å까지 5 Å의 간격으로 변화시켰다. 산화시간은 120 초, 산소플라즈마의 power는 30 W로 일정하게 유지하였다. 이때 측정된 기준저항값은 각각 0.9327 · 1.4556 · 4.1233 · 6.9856 · 7.5045 · 7.4353 · 14.442 · 1.1777Ω 이었다. 그림 6에 나타낸 것과 같이 Al층의 두께가 5 Å와 10 Å일 때 자기저항비는 관찰되지 않았다. 이는 Al층의 두께가 너무 얇기 때문에 핀홀의 증가로 NiFe층과 Co층이 부도체층에 의해 분리되지 못하고 두 층이 결합된

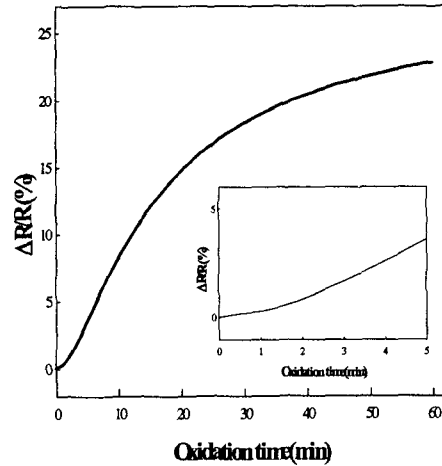


그림 5. 산화시간에 따른 Al의 저항변화율.

Fig. 5. Resistance change ratio of Al as a function of oxidation time.

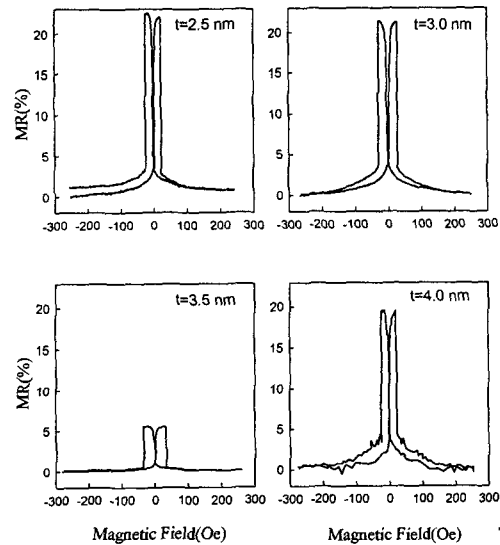


그림 6. Al의 두께(t)에 따른 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(t)/Co(200 Å) 터널접합의 MR 곡선.

Fig. 6. MR curves of different Al thickness(t) in Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(t)/Co(200 Å) tunnel junction.

것으로 생각된다. 또한 바닥층의 NiFe층까지 산화되어 효과적인 터널접합을 이루지 못한 것으로 보

인다. 15 Å부터는 자기저항비가 관찰되기 시작하였다. 이는 15 Å이상의 두께부터는 두께의 증가로 편향등이 어느 정도 보완되기 때문에 편향을 통한 전류흐름보다는 부도체층을 통해 터널링하는 전류의 증가에 기인한 것으로 판단된다. Al층의 두께가 25 Å일 경우 22 %의 가장 높은 자기저항비를 얻었다.

3.2 산화시간에 따른 자기저항비

그림 7은 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å)의 구조에서 Al층을 25 Å으로 고정시키고 산화시간을 90~210 초까지 30 초 간격으로 변화시켰을 때의 각각의 자기저항비 곡선이다.

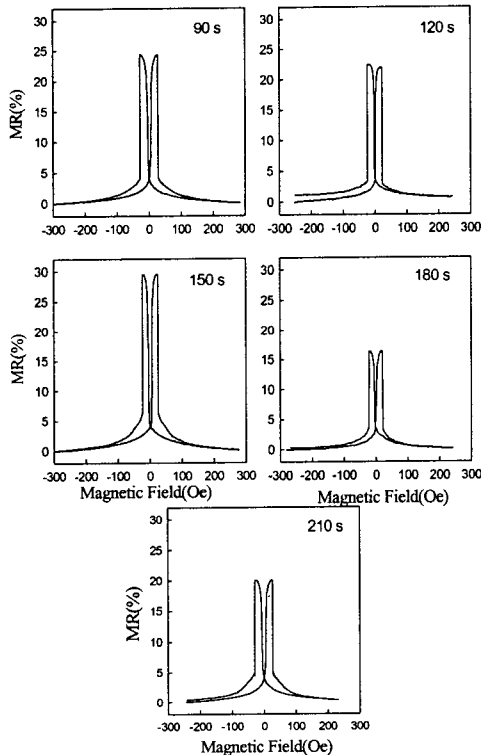


그림 7. 산화시간의 변화에 따른 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å) 터널접합의 MR 곡선.

Fig. 7. MR curves of different oxidation time in Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å) tunnel junction.

이때 측정된 기준저항값은 각각 7.4303 · 7.5033 · 4.3626 · 11.551 · 10.611Ω 이었다. 산화시간을 길게 하면 바닥층의 NiFe까지 산화시키기 때문에 자기저항비가 현저히 감소될 것으로 예상되었으나 210 초까지 산화시켰을 때의 자기저항비는 두드러진 변화없이 약간 증가하다가 감소하는 경향을 보였고, 산화시간이 150 초인 경우 최대 약 30 %의 자기저항비를 보였다. 이는 150 초까지는 유효 산화층 형성이 이루어지다가 그 이후에는 약간의 자성층의 산화가 일어난 것으로 판단된다.

3.3 Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 자화거동

자화거동은 NiFe와 Co의 자화방향에 의해 결정되는데 외부자기장의 변화에 의해 상대적으로 보자력이 약한 NiFe의 자화반전이 먼저 일어나게 되고 반 평행상태의 자화방향을 갖는다. 그 후 자기장을 증가시키에 따라 Co의 자화반전이 일어나며 자화방향은 평행하게 된다. 양쪽 자성체층의 자화방향이 평행하면 전자의 투과확률은 높아지나, 저항은 낮아진다. 또한 양쪽 자성체층의 자화방향이 반 평행하게되면 전자의 투과확률은 낮아지는 반면 저항은 높아지게 된다. 자기저항비 곡선에서 외부자기장의 변화에 따른 저항의 변화는 자화거동

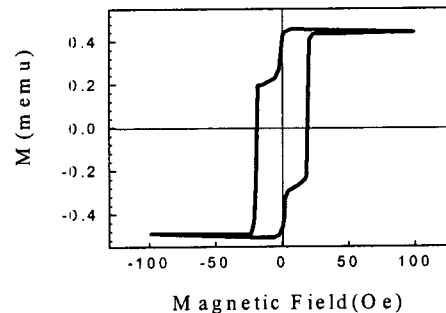


그림 8. M-H 곡선.

- (a) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(5 Å)/Co(200 Å) 터널접합
- (b) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(35 Å)/Co(200 Å) 터널접합

Fig. 8. M-H curves of (a) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(5 Å)/Co(200 Å) and (b) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(35 Å)/Co(200 Å) tunnel junction.

과 비교적 잘 일치한다. 그림 8과 같이 자화저동은 대부분 외부자기장의 크기가 각각 ± 4 과 ± 25 Oe 부근에서 NiFe와 Co의 자화반전이 일어나고 있음을 관찰할 수 있다. 이로 미루어 보아 자기저항비도 4~25 Oe 사이에서 최대가 됨을 예측할 수 있으며 자기저항비 곡선으로부터 이를 확인하였다. 그림 8(a)에서와 같이 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(5 Å)/Co(200 Å) 터널접합에서는 Co와 NiFe의 자화반전이 확실히 구분되지 않았다. 이 경우 자기저항비가 관찰되지 않았고, 측정된 접합 저항은 1 Ω미만으로 낮게 관찰되었다. 그러나 그림 8(b)에서와 같이 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(35 Å)/Co(200 Å) 터널접합에서는 두 자성층의 자화반전이 확실히 구분되어지고 자기저항곡선도 비교적 각형으로 관찰되었으며, 측정된 접합저항도 14 Ω대로 크게 관찰되었다.

3.4 Si/SiO₂/NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 I-V특성

그림 9(a)와 (b)는 각각 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(10 Å)/Co(200 Å)와 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å) 터널접합 구조의 I-V 곡선이다. Al층의 두께가 5 Å과 10 Å인 경우 시편의 I-V 곡선은 선형적이었다. 이 경우 그림 9(a)에서와 같이 외부자기장에 따른 자성체층의 상대적인 자화방향에 상관없이 세 그래프 모두 일치하였다. I-V 곡선의 기울기는 저항의 역수이며 기울기가 일정하면 이것은 음성물질이다. 즉, 안정한 부도체층이 형성된 터널접합이 이루어지지 않은 경우이다. 여기에서는 자기저항비 또한 발견되지 않았다. 그러나 Al층의 두께가 15 Å 이상의 시편에서 I-V 곡선은 대부분 비선형적이었다. 비선형적인 I-V곡선은 터널접합이 이루어졌음을 의미하며, 안정된 부도체층의 형성에 의한 전자의 투과 현상에 기인한 것으로 터널접합이 이루어 졌다고 볼 수 있다. 이 경우 높은 자기저항비가 관찰되었다. 그림 9(b)에서와 같이 두 자성체층의 자화방향이 평행할 경우와 반 평행할 때의 I-V 곡선의 기울기가 서로 다르게 관찰되었는데, 이는 자화방향이 평행할 때가 반 평행할 때의 저항보다 더 낮기 때문에 기울기가 더 높게 나타난 것으로 생각된다.

3.5 불균일한 전류분포 효과에 따른 자기저항 비 재해석

자성체층으로서 NiFe와 Co를 사용했을 경우, Julliere의 모델에 기초한 다음의 식에 의해 계산된

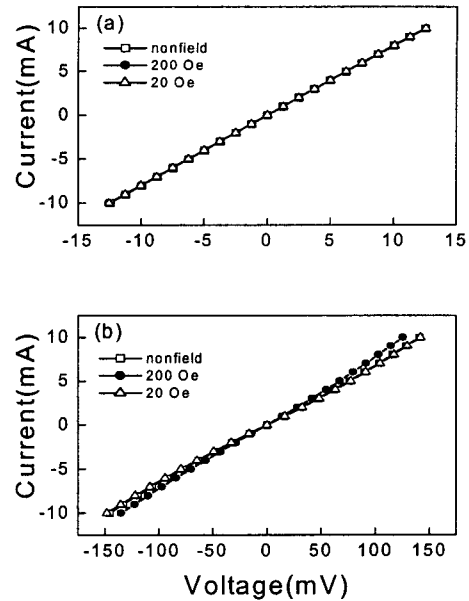


그림 9. I-V 곡선.
 (a) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(10 Å)/Co(200 Å) 터널접합
 (b) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å) 터널접합

Fig. 9. I-V curves of
 (a) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(10 Å)/Co(200 Å) and
 (b) Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(25 Å)/Co(200 Å) tunnel junction.

이론적인 자기저항비는 23 %이다[14].

$$TMR = \frac{\Delta R}{R_p} = \frac{R_a - R_p}{R_p} = \frac{2P_1P_3}{1 - P_1P_3}$$

여기서 NiFe와 Co의 스핀편향(spín polarization)은 각각 30 %, 35 %이다[15]. 본 연구에서는 이론값과 비슷하거나 이를 초과하는 실험값이 관찰되었다. 이는 접합저항이 자성체층의 접합면적에 해당하는 저항보다 작기 때문에 나타나는 불균일한 전류분포 효과로 해석된다[16-18]. 한편 T. Miyazaki 등은 이러한 현상을 사이층(부도체층)의 불안정에 기인한 거칠기의 증가로 외부자장이 영(zero)일 때 자화의 분산이 일어나기 때문으로 해

석하고 있다.[19] 본 연구에서 자성체의 면저항은 20~30 Ω인데 반하여 접합저항은 수 Ω에 불과하기 때문에 접합면적내의 전류가 균일하게 흐르지 않고, 또한 안정한 부도체층이 형성되었다고 보기 어렵기 때문에 위에서 고찰된 불균일한 전류분포 효과와 자화의 분산현상으로 인해 자기저항비가 실제 값보다 크게 관찰된 것으로 보여진다.

4. 결 론

편평도의 향상과 누설전류효과의 억제제를 위하여 일반 Si기판 위에 SiO₂를 형성시킨 Si/SiO₂/NiFe(300 Å)/Al₂O₃(t)/Co(200 Å) 터널접합 구조에서 Al₂O₃ 형성조건에 따른 강자성 터널접합의 자기적 특성의 연구로부터 실온에서 최대 30 %의 자기저항비를 얻었다. 부도체층의 두께에 따른 자기저항비는 15Å 이상의 두께에서부터 관찰되었는데, 이는 핀홀의 형성으로 그 이하의 두께에서는 두 자성체층이 분리되지 않기 때문에 나타난 현상으로 생각된다. 산화시간에 따른 자기저항비는 본 실험의 조건에서는 큰 변화가 관찰되지 않았으며, 보다 길거나 짧은 산화시간에 대한 추가 연구가 진행중이다. 자기저항비 곡선에서 외부자기장의 변화에 따른 저항의 변화는 자기이력곡선의 자화거동과 잘 일치하는 것으로부터 저항의 변화는 두 자성층의 자화방향에 기인한 스핀-의존 투과현상에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 자기저항비가 관찰된 시편의 I-V 곡선이 비선형적인 형태를 나타내는 것으로 터널접합이 잘 이루어졌음을 확인했다. 본 연구에서 얻은 자기저항비가 이론값과 비슷하거나 초과된 것은 불균일한 전류분포 효과와 자화의 분산 때문으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2000학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

[1] M. Julliere, Phys. Lett., **54A**, 225, 1975.
 [2] Y. Suezawa and Y. Gondo, Proc. Int. Symp.

Physics of Magnetic Materials, Sendai **MAG-18**, 303, 1987.
 [3] T. Yaoi, S. Ishio and T. Miyazaki, J. Magn. Mater., **98**, 430, 1993.
 [4] T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Mater., **139**, L231, 1995.
 [5] 현준원, "[CoO/NiO)/NiFe/Cu/NiFe]Spin-Vale 박막에서의 자기저항효과와 자기적 특성에 대한 연구, 한국전기전자재료학회지, 9권 10호, pp.1060 - 1065, 1996.
 [6] T. S. Plaskett, P. P. Freitas, N. P. Barrabas, M. F. da Silva and J. C. Soares, J. Appl. Phys., **76**, 6104, 1994.
 [7] 정창욱, 조용진, 안동환, 정원철, 조권구, 주승기, "CoO를 절연층으로 이용한 스핀 의존성 터널링 접합에서의 자기저항 특성", 한국자기학회지, 10권 4호, pp.159-163, 2000.
 [8] Y. Suezawa, F. Takahashi and Y. Gondo, Jpn. J. Appl. Phys., **31**, L1415, 1992.
 [9] W. J. Gallagher, S. S. Parkin, Yu Lu, X. P. Bian, J. Appl. Phys., **81**, 3741, 1997.
 [10] R. Nakatani, M. Kitada, J. Mater. Scien. Lett., **10**, 827, 1991.
 [11] Y. Takemura and J. Shirakashi, Jpn. J. Appl. Phys., **40**, 128, 2001.
 [12] 백주열, 현준원, "부도체층 제작조건에 따른 강자성 터널접합의 투과자기저항 특성 연구", 한국표면공학학회지, 32권 1호, pp.61-66, 1999.
 [13] 백주열, "NiFe/Al₂O₃/Co 박막의 투과자기저항 효과에 관한 연구", 단국대학교 박사학위 논문, 31p, 1998.
 [14] S. Maekawa and U. G*fvrt, IEEE Trans. Magn. **MAG-18**, 707, 1982.
 [15] R. Meservey, D. Paraskevopoulos and P. M. Tedrow, J. Appl. Phys., **49**, 1405, 1978.
 [16] J. S. Moodera, L. R. Kinder, J. Nowak, P. LeClair, and R. Meservey. Appl. Phys. Lett. **69** (5), 1996.
 [17] R. J. M. van de Veerdonk, J. Nowak, R. Meservey, J. S. Moodera, W. J. M. de Jonge, Appl. Phys. Lett., **71**, (19), 2839, 1997.
 [18] Y. Endo, O. Kitakami, Y. Simada, Appl. Phys. Lett., **72**, (4), 495, 1998.
 [19] T. Miyazaki, Proc. of ICPMM '96, Seoul, Korea, 7, 1996.