

비결합형 터널접합구조에서 Cr 하지층에 따른 전자기적 특성변화

박진우* · 전동민 · 윤성용 · 이종운 · 서수정

성균관대학교 정보통신융 신기능성 소재 및 공정연구센터, 수원시, 400-746

(2002년 9월 24일 받음, 2003년 4월 20일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터를 사용하여 Cr/Co/Al-O_x/Co/Ni-Fe 다층박막에 다양한 두께의 Cr 하지층을 삽입함에 따른 자기적 특성 및 전기적 특성에 관하여 연구하였다. 3 nm 두께의 Cr 하지층 증착시 자기저항비의 변화는 관찰할 수 없었고 적절한 Cr 두께가 증가함에 따라 Co의 보자력이 크게 증가되었다. 또한, 산화시간이 길수록 두 강자성층간에 보자력 차이 및 절연층의 저항이 점차 증가하였는데, 이는 산화시간에 따라 상부층 계면의 평탄성의 증가에 기인하는 것으로 생각되며 TEM을 통하여 확인할 수 있었다. Cr 하지층 유무에 관계없이 최고 자기저항비가 나타나는 절연층의 산화시간은 60~70초로 비슷하였지만 Cr 두께가 증가할수록 자기저항비는 감소하였다. 이는 전극간 계면의 거칠기의 증가로 인해 미반응 Al의 잔존 확률이 상대적으로 커짐에 따라 터널 전자의 산란이 증가함으로써 나타나는 것으로 생각된다. 이러한 결과로 Cr 하지층의 두께는 3 nm로 고정하였으며 하지층의 증착 및 적정산화를 통하여 두 강자성층간에 큰 보자력 차이를 유도할 수 있었다. 이는 재현성에 있어서 가장 큰 문제점을 지닌 TMR 소자에 매우 긍정적인 해결방안을 제시할 수 있게 된다.

주제어 : Cr 하지층, Co 보자력, 계면거칠기, TMR

I. 서 론

디지털 및 정보통신의 급성장에 따라 하드웨어를 구성하고 있는 정보 저장 및 처리 기술에 대한 요구가 가중되고 있다. 하지만 정보 기록 저장 소자에 사용하고 있는 DRAM은 휘발성 메모리일 뿐 아니라 기록밀도의 고 집적화에도 그 한계성을 점차 드러내고 있으며 새로운 정보 기록 저장 소자의 개발을 필요로 하고 있다. 자기 메모리 소자(Magnetic Random Access Memory, MRAM)[1]는 이러한 한계성을 극복할 수 있는 차세대 소자로서 연구가 진행되고 있다[2]. MRAM은 거대자기저항(Giant Magnetoresistance, GMR)과 터널링 자기저항(Tunneling Magnetoresistance, TMR)현상을 자기메모리소자에 적용하는 단계까지 발전되어 왔으며[3] 비휘발성 메모리 소자이면서 처리속도가 빠른 장점을 지니고 있다. 그 중에서 TMR 현상은 절연층(일반적으로 Al-O_x)을 사이에 둔 두 강자성층(ferromagnetic layer)의 샌드위치 구조로서 두 강자성층의 스핀배열에 따라 저항이 변하는 것을 기본 원리로 하고 있으며 GMR 소자와는 달리 전류가 접합계면에 수직으로 흐르기 때문에 기록밀도의 고집적화에 유리하고 높은 자기저항비를 얻을 수 있기 때문에 MRAM의 실용화 가능성을 크게 하고 있다. 하지만 본 연구에서는 반강자성체를 사용하지 않는 비 결합형 스핀밸브 구조를 선택하였기 때문에 얇은 절연층을 사이에 둔 두 강자성층은 증착조건 및 원하지 않는 계면의 거칠기 등이 쉽게 자기적 결합을 발생하게 된다. 이는 외부 자장에 대해 고유한 보자력을 유지하지

못하고 자화 반전이 발생됨으로써 두 강자성층간에 작은 보자력 차이를 나타내며 소자로서의 응용성을 떨어뜨리게 된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 Cr을 증착함으로써 하부 Co층의 보자력을 향상시킬 수 있는 조건에 관하여 고찰하였다. 또한 절연층의 특성 변화에 따른 두 강자성층의 보자력 및 자기저항비의 변화에 관하여 분석함으로써 소자의 전자기적 특성 변화를 고찰하였다.

II. 실험 방법

TMR 소자 제작은 9.0×10^{-7} torr이하의 진공도하에서 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하였으며 Coming 7059 glass/Cr t nm/Co 10 nm/Al-O_x 2.5 nm/Co 3 nm/Ni-Fe 12 nm와 같이 터널접합 구조를 형성시키기 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 금속 마스크를 사용하였다. Fig. 1(a)의 2)와 3)과의 전극폭은 0.2 mm로 하였으며 (b), (c)에서는 전극의 구조에 관하여 나타내었다. 기존의 스트립 방식의 경우 2회의 대기노출을 하여야 하나 본 실험에 사용된 마스크의 경우에는 1번의 대기노출만을 필요하기 때문에 하부 Co/Al-O_x의 계면의 불필요한 가스의 혼입을 방지할 수 있었다. 절연층의 제조는 글로우 방전 산화법을 채택하였으며 자세한 각각의 공정조건은 Table I에 나타내었다. 그리고 강자성층의 자기적 이방화를 위해 100 Oe의 자장 하에서 증착을 수행하였다.

자기적 특성은 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하여 증착조건에 따른 보자력과 포화 자화값의 변화를 고찰하였다. 전기적 특성은 4단자법과 Keithley 236 model을 이용하여 I-V 특성을 측정하였으며 이때 barrier height와 barrier

*Tel: (031)290-7377, E-mail: parkgun999@hanmail.net

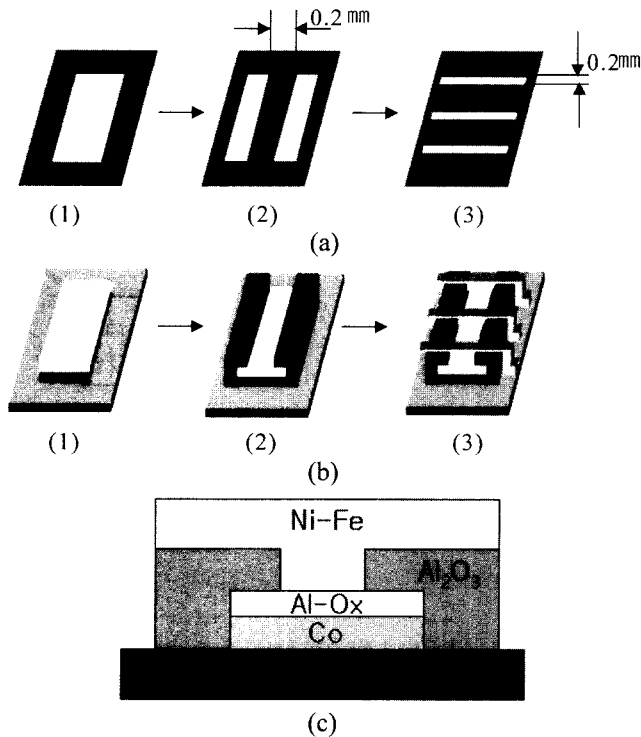


Fig. 1. Schematics of metal masks (a) and junction structures (b), (c).

Table I. Deposition conditions for magnetic tunneling junctions.

| Conditions Layers | Power (W) | Pressure (mtorr) | Working gas | T-S distance (cm) | Depo. rate (Å/sec) |
|-----------------------------------|-----------|------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| Cr | 25 | 4.3 | Ar | 5 | 2.5 |
| Co | 15 | 4. | Ar | 5 | 1.54 |
| Al | 7 | 8.6 | Ar | 5 | 0.93 |
| Oxidation | 25 | 27 | O ₂ :Ar=1:2 | 5 | |
| Ni ₈₁ Fe ₁₉ | 14 | 4.3 | Ar | 5 | 2 |

width는 Simmon's 식을 이용하여 분석하였다[4]. AFM(Atomic Force Microscopy)을 사용하여 계면 거칠기를 분석하였으며 각 층의 미세구조 및 절연층의 형성에 대해서는 JEOL 300 KV TEM(Transmission Electron Microscopy)을 이용하였다.

III. 실험결과

Glass/Co 10 nm/Al-O_x 2.5 nm/Co 3 nm/Ni-Fe 12 nm와 같이 전극으로 사용되는 두 자성층의 보자력 차이에 의존하는 비결합형 터널 소자의 재현성을 증가시키기 위해 Cr을 사용하여 하부 Co층의 보자력 향상을 시도하였다. Fig. 2(a)는 상·하부 전극의 자기이력 곡선 및 절연층을 사이에 둔 두 강자성층의 자기이력 곡선이다. 그림에서 보면 두께 10 nm에서 하부Co층의 보자력은 약 30 Oe이며 상부층(Co 3 nm/Ni-Fe 12 nm)의 보자력은 약 6 Oe이다. 하지만 절연층을 사이에 둔 샌

드위치 구조에서 하부층의 보자력이 약 15 Oe로 작아짐을 알 수 있다. 이는 절연층의 특성에 민감하게 반응하는 두 강자성층간의 자기적 결합이 발생하여 하부 Co층이 상부층(Co/Ni-Fe)의 영향으로 외부 자장에 의해 쉽게 자화반전이 일어나는 것을 나타내고 있다[5]. Fig. 2(b)는 Cr을 증착했을 때의 자기이력 곡선을 나타내고 있다. Cr의 영향으로 하부 Co층의 보자력은 30 Oe에서 60 Oe로 증가함을 알 수 있으며 상부층과 하부층의 샌드위치 구조에서 두 강자성층간에 보자력 차이가 크게 증가함을 알 수 있다.

많은 연구자들에 의해 Co의 Cr 하지층의 영향에 대한 연구가 이루어져 왔으며 스퍼터링법을 이용하는 경우에 Co의 두께와 증착법에 따라 결정구조가 크게 영향받고 있음을 제시하였다[6, 7]. Cr은 기본적으로 bcc 결정구조를 갖게되며 MgO[110]에 의해 Cr이 [211]의 우선 방위를 갖게 되는 것은 C. K. Lo에 의해 밝혀졌다. 이로 인하여 Cr 위에 증착된 Co의 hcp 성장을 유도하였으며, 이 경우 hcp의 큰 자기이방 에너지에 의해 약 400 Oe의 보자력을 얻고 있다[8]. 하지만 위의 방법은 Molecular Beam Epitaxy(MBE)법을 이용한 것으로 본 실험에서 이용한 스퍼터링 법과는 다르다. 본 연구에서는 타 연구에 비해 하부Co층의 보자력이 매우 작았으며 이로 인해 fcc와 hcp 구조가 혼재 되어 있음을 알 수 있었고[9] Cr의 두께에 따라 보자력이 증가하는 가장 큰 요인으로는 거칠기의 증가에 의한 것으로 사료된다. 이는 거칠기가 증가할수록 계면에서 발생하는 magnetic pole에 의해 self pinning field가 발생되며 이로 인하여 하부 Co층의 보자력이 증가하게 된다[10]. Fig. 2(b)의 두 강자성층간 샌드위치 구조를 보면 상부층과 하부층의 전극간 스펙트럼이 반 평행한 구간에서 약간의 기울기가 존재함을 알 수 있다. 이는 Cr 증착시 거칠기의 증가로 두 전극간에 Neel coupling이 발생하는 것으로 사료되며 Cr의 두께의 증가에 따라 거칠기의 크기는 더욱 커짐을 알 수 있었다. 이 경우 상대적으로 보자력이 작은 Ni-Fe가 먼저 자화 반전이 된 후에 Co가 자화 반전하게 되는데 이때 Ni-Fe가 Co의 자화 반전을 유도함으로써 Co의 보자력을 낮추는 역할을 하게 된다.

Fig. 3에서는 Cr 두께에 따른 Co의 보자력 변화를 나타내고 있다. Cr 두께가 증가할수록 거칠기가 증가하며 이로 인하여 Co의 보자력이 점차 증가됨을 나타내고 있다.

Fig. 4에서는 Cr 두께에 따른 표면 거칠기 및 산화시간에 따른 접합저항의 변화를 나타내고 있다. 우선 Cr 두께가 증가함에 따라 점차 표면 거칠기의 RMS(Root-Mean-Square) 값이 증가됨을 알 수 있다. Cr 증착시 비록 보자력은 증가하나, 거칠기가 증가되면 상·하부 전극간 자기적 결합이 증가되고 이로 인해 보자력은 감소하게 된다. 거칠기가 증가하게 되면 균일한 절연층 형성이 어려워지게 된다. 이로 인해 불완전한 산

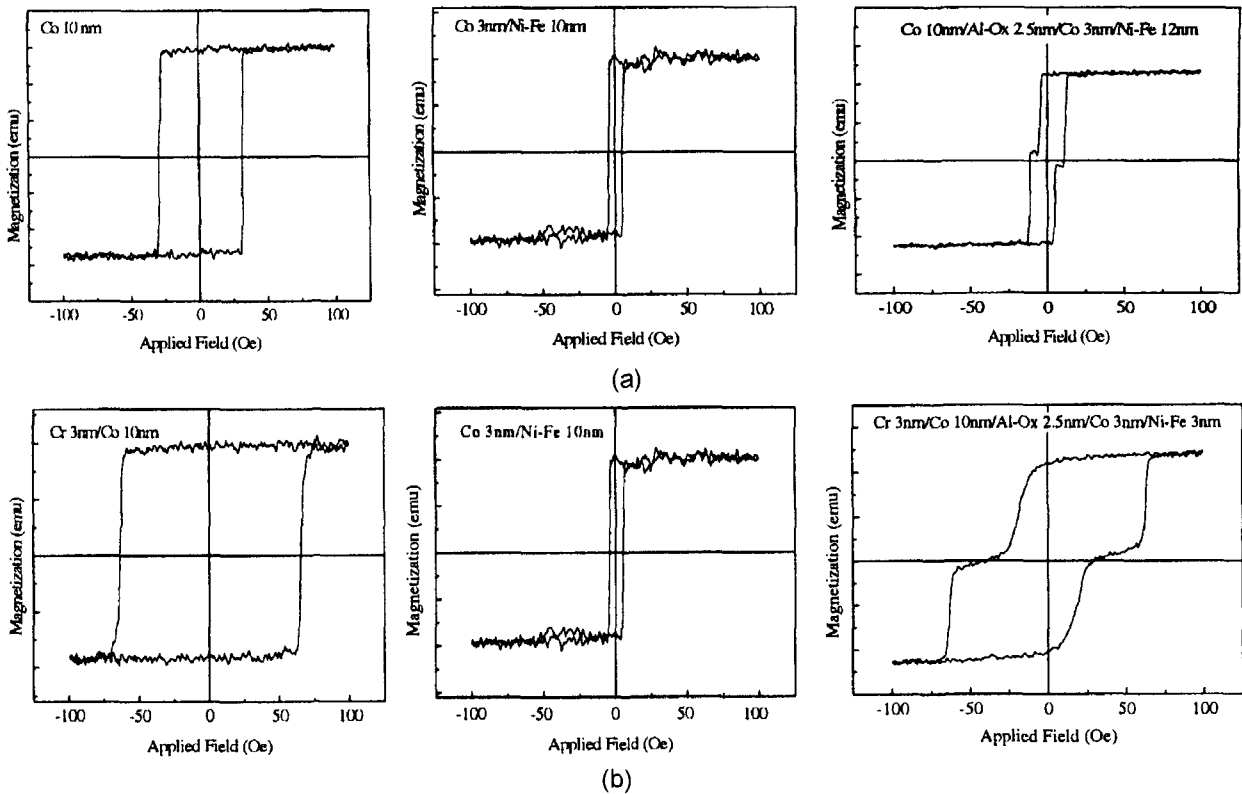


Fig. 2. M-H loops of (a) Si/Co 10 nm, Si/Co 3 nm/Ni-Fe 12 nm and Co(10 nm)/Al-O_x (2.5 nm-70 sec oxidation)/Co(3 nm)/Ni-Fe, (b) Si/Cr 3 nm/Co 10 nm, Si/Co 3 nm/Ni-Fe 12 nm and Si/Cr 3 nm/Co(10 nm)/Al-O_x(2.5 nm Al Oxidation)/Co(3 nm)/Ni-Fe (10 nm).

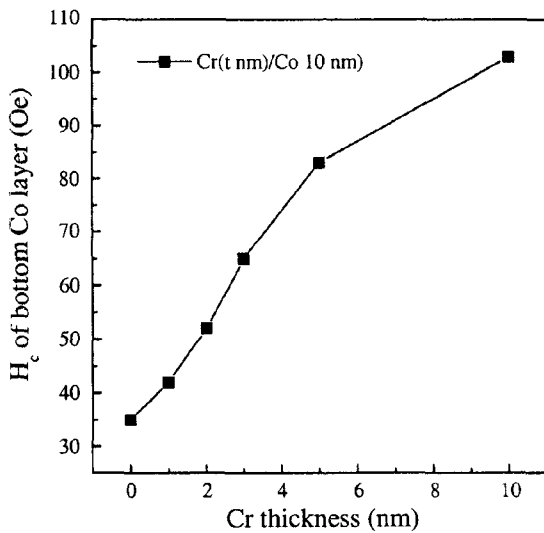


Fig. 3. Variation of H_c of the Co bottom electrode in Cr(t Å)/Co(100 Å) with various Cr thickness.

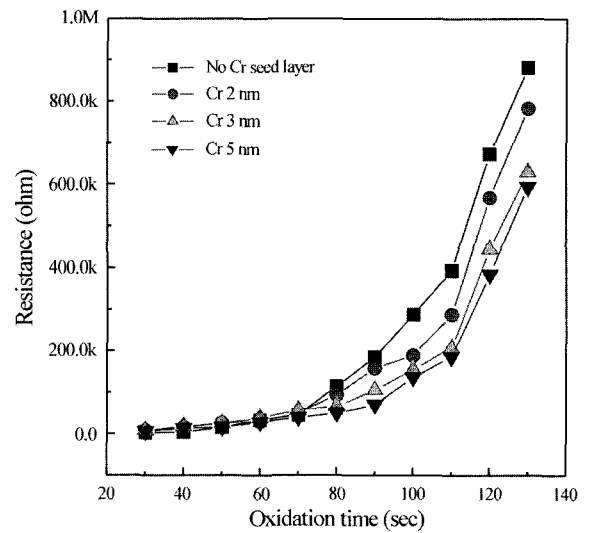


Fig. 4. Variation of resistance in tunneling junctions with various Cr seed layer, the inset exhibits the increase of RMS.

화가 이루어지며 산화되지 않은 잔류 Al이 존재할 가능성은 커지게 된다. 이는 Al 전도전자로 인하여 터널링되는 강자성체 전자의 분극률을 낮추는 역할을 하게 됨으로써 자기저항비를 낮추는 요인으로 작용한다. 미 반응된 Al은 강자성의 전자가 산란을 일으키는 곳으로 작용함으로써 일정한 자화 방향을

유지할 수 없게 되어 자기저항비가 감소하게 된다. Cr 두께에 따른 거칠기와 비교해보면 Cr 두께가 증가할수록 거칠기가 증가하여 접합저항이 작아짐을 알 수 있다. 거칠기가 증가할수록 균일한 Al-O_x 형성이 어렵게 되며, 이 경우 절연층을 형성하지 못한 Al의 전도전자가 절연층을 통과하면서 접합저항을 낮

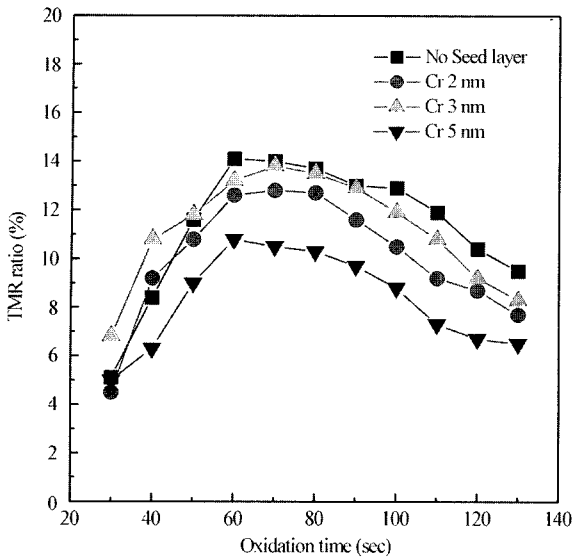


Fig. 5. Variation of TMR ratio as a function of oxidation time in a tunneling junctions with various Cr thickness.

추게 된다. 산화시간이 증가되더라도 이러한 경향성은 계속 유지되는데 이는 잔존하는 Al은 없더라도 거칠기가 증가할수록 상대적으로 얇은 부분에서 절연층을 통과함으로써 균일한 절연층 보다 더 낮은 저항을 나타낼 수 있다고 생각된다.

Fig. 5에서는 Cr 두께 및 산화시간에 따른 자기저항비의 변화를 나타내고 있다. Cr 두께가 3 nm 이상이 되면 Cr을 사용하지 않은 경우보다 낮은 자기저항비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 계면 거칠기로 인하여 앞부분에서 언급했던 상대적으로 많은 잔류 Al에 의한 터널링 전자의 산란과 스핀 비 의존 전자의 전도에 대한 기여도 증가 그리고 두 강자성 층간의 Neel coupling의 증가 등으로 자기저항비가 감소되는 것으로 사료된다[11]. 즉 Cr 증착시 자기저항비의 향상은 없었으며 산화시간에 따른 자기저항비의 변화는 대체적으로 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig. 6은 산화시간에 따른 보자력과 자기저항비의 변화를 Cr을 사용하지 않은 경우와 비교하여 나타내었다. Fig. 6(a)에

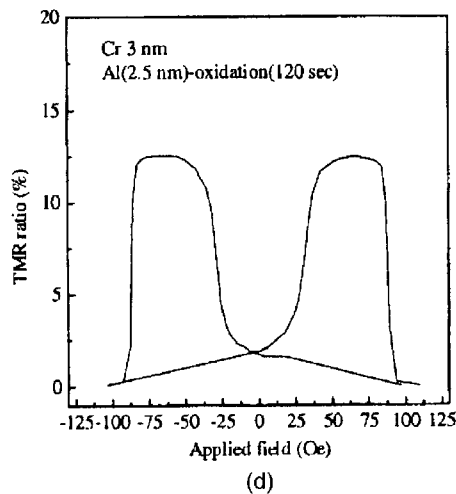
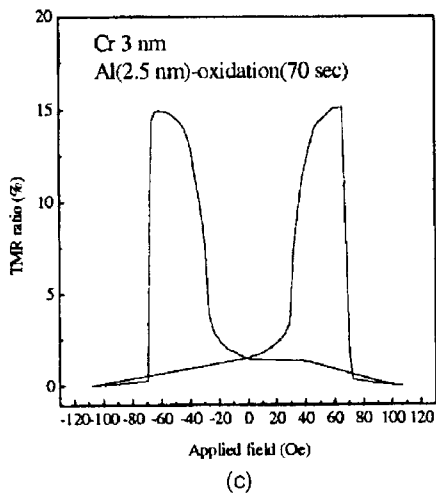
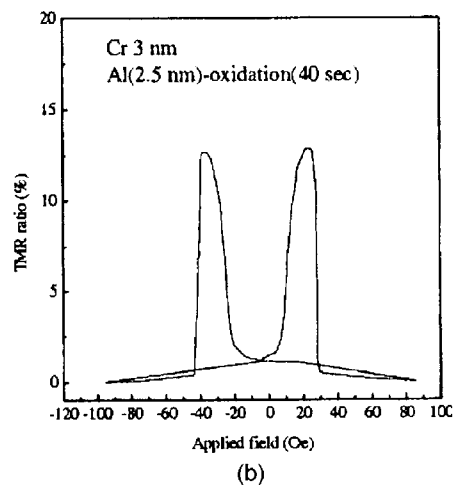
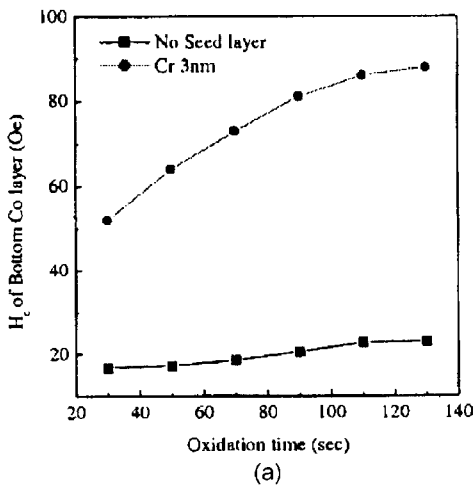


Fig. 6. Variation of Hc of Co bottom electrode (a) and R-H curves (b) (c) (d) of tunneling junctions with various oxidation time 40 sec, 70 sec and 120 sec respectively.

서 보면 산화시간이 증가함에 따라 하부 Co층의 보자력이 점차 커짐을 알 수 있다. 이는 Cr을 사용하지 않은 경우도 같은 경향성을 보이지만 그 증가율은 Cr을 증착한 결과와 비교할 때 낮은 증가율을 보이고 있다. Fig. 6(b)에서 보면 Cr 증착 시 산화시간이 70초 일 때 14%의 자기저항비를 갖으며 절연층 산화시간이 70초 이상일 때 자기저항비는 감소하는 반면 두 강자성층간 보자력 차이는 계속 증가함을 나타내고 있다. 이를 통하여 Cr에 의한 Co 자화반전 형태의 변화 및 산화시간 증가에 따른 두 강자성층간 Neel coupling의 감소로 인해 절연층을 사이에 둔 두 전극의 보자력 차이가 점차 증가하였음을 확인할 수 있었다. 산화시간에 따른 절연층의 두께 증가 및 거칠기 감소는 TEM 분석을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 산화시간이 증가하면서 절연층과 인접한 Co 입계에서의 산화로 인해 CoO_x 가 형성되고 이것이 자화 반전을 방해하는 요소가 됨으로써 보자력을 증가시킬 수 있으며 과 산화시 Co 산화로 인한 Co의 두께 감소 및 Co와 CoO 사이의 교환결합 등에 의해서도 보자력이 증가될 수 있다는 보고가 있다[12, 13] 하지만 본 연구에서는 CoO 의 형성은 발견할 수 없었다.

Fig. 7은 절연층의 산화시간에 따른 다층박막 구조를 TEM을 이용하여 나타낸 사진이다. 전극과 절연층이 이루는 상하 계면이 상이함을 알 수 있다. $Co/Al-O_x$ 의 하부 계면은 평활한 계면을 형성한 반면, 상부쪽의 계면은 대체로 물결모양을 하고 있다. 또한 산화가 진행됨에 따라 상부 계면의 평활도가 양호해짐을 알 수 있다. Al의 산화기구는 산소의 유입과 함께 Al의 공급이 필요하므로 Al층 아래쪽의 미 반응 Al 원자들이 산소와 반응하기 위한 이동이 발생하게 된다. 고 특성의 Al 산화층을 형성하기 위해서는 Al 층의 거칠기가 없어야 하나, 본 실험의 경우에는 거칠기가 존재하는 것을 알 수 있었다. 증착후 Al 층은 비 결정상태이므로 산화반응은 방향성 없이 산소의 유입량에 의존하게 된다. 산소의 유입이 진행되는 동안에 미 반응 Al은 상대적으로 두꺼운 부분에 존재할 가능성이 많고 이에 따라 산화반응을 위하여 얇은 쪽으로 이동하게 됨에 따라 상부 계면의 평활도가 증가함을 알 수 있었다[14]. Fig. 7에서 보는 바와 같이 평활도가 과산화 시에 증가함을 보인다. 자기저항비에 영향을 미치는 잔류 Al이나 과산화시 Co 산화물의 발생 등은 영상 콘트라스트의 차이가 없기 때문에 구분할 수 없었고, 또한 EDX를 통해서도 전자빔의 반응체적이 상대적으로 크기 때문에 정확한 정성·정량분석은 어려웠다.

Fig. 8은 최고의 자기저항비를 나타내는 각 소자의 산화조건 하에서 인가전압에 따른 자기저항비의 변화를 나타내고 있다. 가해진 전압이 증가함에 따라 전도의 증가, magnon의 활성화, 자성층의 밴드구조에서 스핀 분극율의 에너지에 대한 의존성[15] 등에 의해 자기저항비가 변화하며, 일반적으로 수백 mV에서 자기저항비가 크게 감소하게 된다고 알려져 있다

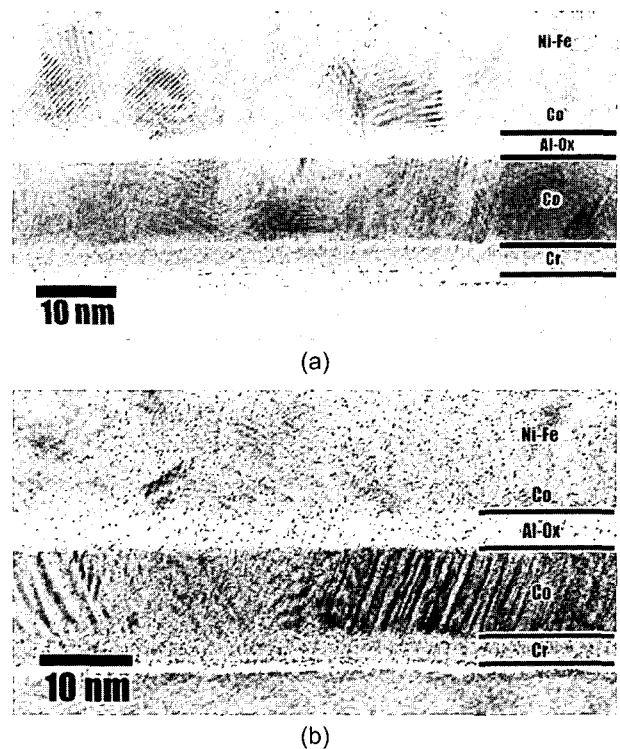


Fig. 7. Cross sectional TEM image of tunneling junctions with a optimum oxidation time (70 sec) (a) and over oxidation (140 sec) (b).

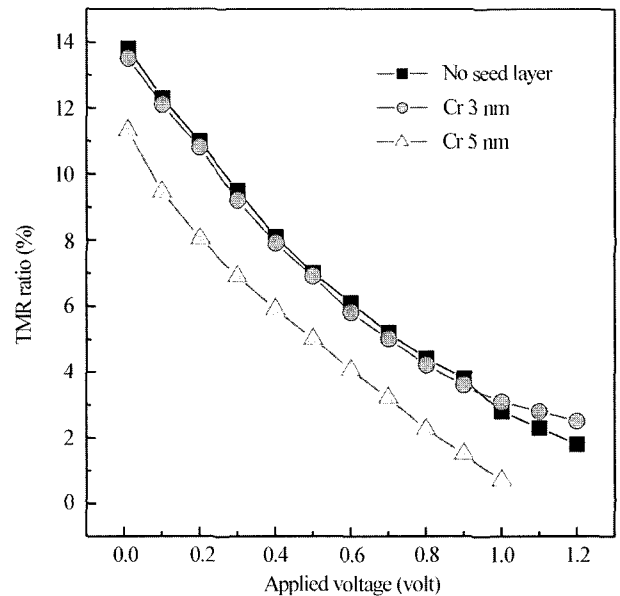


Fig. 8. Dependence of applied voltage in tunneling junctions with Cr thickness of 0 nm, 3 nm and 5 nm.

[16]. 통상 자기저항비가 반값으로 줄어드는 인가전압을 측정함에 따라 절연층의 특성을 평가하게 되며 절연층의 특성이 양호할수록 자기저항비는 인가전압에 대한 의존성이 감소하게 된다. Fig. 8을 보면 Cr층이 없거나 3 nm인 경우 약 0.51 V에서 자기저항비가 반으로 줄어드는 반면 5 nm인 경우에는

0.43 V에서 자기저항비가 반으로 줄어들게 된다. 또한 자기 저항비가 0이 되는 전압은 Cr층이 3 nm인 경우 5 nm보다 크게 나타난다. 이는 하부전극 Co와 절연층의 계면 거칠기가 작을수록 우수한 절연층이 형성되었음을 보여주고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Cr 하지층에 의한 Co/Al-O_x/Co/Ni-Fe 다층 구조의 전자기적 특성을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Cr을 증착함으로써 거칠기의 증가로 인하여 상·하부 전극간에 보자력 차이를 크게 할 수 있었다.

2) Cr의 두께가 증가함에 따라 계면 거칠기의 증가는 동일한 산화조건에서 접합 저항의 감소를 발생시켰다.

3) Cr층 유무에 관계없이 산화시간에 따른 자기저항비의 변화는 동일한 경향을 보였고, Cr의 두께가 3 nm 이상이 되면 계면 거칠기의 증가로 인하여 낮은 자기저항비를 나타내므로 Cr의 두께는 3 nm가 최적임을 알 수 있었다.

4) Al층의 산화시간이 증가할수록 상부 전극과 절연층의 계면의 거칠기의 감소하며 이는 상·하부전극의 Neel coupling 감소를 발생시켰고, 이로 인해 두 강자성체 전극사이의 보자력 차이가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

5) 3 nm의 Cr층 증착시 절연층의 산화시간이 70초 일 때 약 14%의 최대 자기저항비를 얻을 수 있었다. 하지층이 없거나 3 nm인 경우 약 0.51 V에서 자기저항비가 반으로 줄어드는 반면, 5 nm인 경우에는 0.43 V에서 동일한 현상을 보였고 자기저항비가 사라지는 전압 역시 낮았다. 이는 계면 거칠기가 증가할수록 인가 자장에 대한 의존성은 증가하며 이로 인해 미반응 Al이 존재하며 적정한 경우 (Cr층을 사용하지 않는 경우 혹은 3 nm Cr층을 삽입한 경우) 보다 얇은 절

연층이 형성되었음을 현상적으로 보여주는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단의 지역협력연구센터(RRC)인 성균관대학교 정보통신용 신기능성 소재 및 공정 연구센터의 지원(R12-2002-008-01001-0)으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. M Daughton, *Thin solid films*, **216**, 162 (1992).
- [2] Terue Masumoto, *Nikkei electronics asia*, **70**, 56 (2000).
- [3] J. M. Daughton, *Thin solid films*, **216**, (1992), 162.
- [4] J. G. Simmons, *J. Appl. Phys.*, **34**, 1973(1963).
- [5] Andrew C. C. Yu, Amanda K. Petford-Long, Kevin O'Grady and Terunobu Miyazaky, *J. Appl. Phys.*, **91**(8), 5236 (2002).
- [6] J. J. de Miguel, A.Cebollada, J. M. Gallego and S. Ferrer, *Surf. Sci.* **211**, 732 (1989).
- [7] C. M. Schneider, P. Bressler, P. Schuster and J. Kirschner, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1059 (1990).
- [8] C. K. Lo, Y. Liou, C. P. Chang, I. Klik, and Y. D. Yao, *Appl. Phys. Lett.*, **68**(15), 2155 (1996).
- [9] C. K. Lo, I. Klik, C. P. Chang, and Y. Liou, *Appl. Surf. Sci.* **113/114**, 163 (1997).
- [10] S. A. Doherty, J. G. Zhu, M. Dugas, S. Anderson, and J. Tersteeg, *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 840 (1998).
- [11] L. Neel, *C. R. Acad. Sci.*, **122**, 521 (1963).
- [12] Y. Ando, M. Yokota, N. Tezuka, T. Miyazaki, *J. Magn. Magn. Mater.* **198**, 155 (1999).
- [13] J. Zang and R. M White, *J. Appl. Phys.*, **83**(11), 6513 (1998).
- [14] D. M. Jeon, J. W. Park, S. Y. Yoon in: Joint International Plasma Symposium of 6th APCPST, 15th SPSM, OS 2002 and 11th KAPRA, Korea, PM-016 (2002).
- [15] Yu Lu, X. W. Li, and Gang Xiao, *J. Appl. Phys.*, **83**(11), 6513 (1998).
- [16] A. C. Marley and S. S. P. Parkin, *J. Appl. Phys.*, **81**, 5526 (1997).

The Electromagnetic Properties in Uncoupled Tunnel-junction with Various Cr Seed Layer

J. W. Park*, D. M. Jeon, S. Y. Yoon, J. Y. Lee, and S. J. Suh
Dept. of Metallurgical Eng., SungKyunKwan Univ., Suwon 440-746, Korea

(Received 24 September 2002, in final form 20 April 2003)

Cross-geometrical Cr/Co/Al-O_x/Co/Ni-Fe tunnel junctions were fabricated by magnetron sputtering. To form an insulating layer, The Al layer was oxidized in an atmosphere of oxygen-argon mixture at low power after deposition. To enhance the coercivity of the bottom Co layer, The Cr seed layer was deposited on the glass and it led to increase in coercivity. The coercivity increase is due to the increase of roughness through the Cr thickness. In over oxidation time, the oxidation of Co bottom layer and flat interface of insulator can increase the bottom Co coercivity. But TMR ratio gradually decrease. TMR ratio is relevant with Cr thickness, insulator thickness, and oxidation time. The maximum TMR ratio was 14% at room temperature and the TMR ratio was decreased to half at 0.51 V.

Key words : Cr seed layer, coercivity, electrode roughness, MR ratio, interface