

[(CoO/NiO)/NiFe/Cu/NiFe] Spin-Valve 박막에서의 자기저항효과와 자기적 특성에 대한 연구



The Study of Magnetoresistance and Magnetic Properties in [(CoO/NiO)/NiFe/Cu/NiFe] Spin-Valve Thin Films

현 준 원

(June-Won Hyun)

Abstract

We have studied the magnetoresistance phenomena on spin valve thin films of antiferromagnetic NiO/CoO. Interlayer coupling oscillates between the antiferrocoupling and ferrocoupling with the variation of Cu thickness. The exchange coupling strength between NiO (antiferromagnetic) and NiFe(ferromagnetic) as a function of NiO texture and interface roughness is investigated by CoO insertion. CoO has significantly higher anisotropy in the (111) plane and interface roughness. It seems that the MR-ratio is increased by CoO inserted films. From the AFM and XRD data, the increase of MR-ratio and exchange field is influenced by the roughness of CoO.

Keywords(중요용어) : Magnetoresistance(자기저항), Exchange field(교환력)

1. 서 론

최근의 자기저항에 관한 연구는 강자성물질인 NiFe, Fe, Co와 비자성물질인 Cu, Cr 그리고 반강자성인 NiO, CoO, FeMn 등을 이용한 박막에 대해서 수행되고 있다. NiCoO와 같이 인위적인 조성물질에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있는데, Judy 등의 연구결과에 따르면 약 6%의 자기저항비를 얻었고, 이때 교환력의 크기는 150 Oe 내외로 보고되었다¹⁾. Sugita 등의 연구에 따르면 NiO/NiFe/Cu/NiFe의 막구조를 갖는 시료에서 비자성층인 Cu의 두께에 따라 강자성층간의 결합인 interlayer coupling이 변화하는 것을 보여준다²⁾. 그외에 FeMn을 이용한 교환력에 관한 연구도 보고되었다³⁾.

최근의 자기저항에 관한 연구가 반강자성체를 이용한 박막에서 이루어지는 이유는 반강자성체와 강자성체 사이의 교환이방성으로 인하여 지금까지의 연구에서 발견된 peak 형태의 자기저동과는 달리 계단형 곡선의 자기저동을 갖게 됨으로써 기록

매체 및 센서적인 특성이 더 우수하기 때문이다.

NiO와 CoO의 경우 두 물질 모두 O²⁻의 매개역할을 통한 교환이방성을 갖고 있으므로 이를 이용한 자기저항 거동이 연구되고 있다. 특히 NiO는 반강자성에서 상자성으로의 상변이 온도인 Néel 온도가 상온보다 200 K 정도 높으므로 센서 및 기억소자로서의 응용이 용이하여 상온에서의 연구가 다른 물질들보다 활발히 이루어져 왔다. 자기저항비, 보자력 그리고 교환력등에 대한 연구가 행해지고 있으며, 여기에 더욱 우수한 특성을 지닌 시료를 개발하고자 여러 형태의 박막이 연구되고 있는 실정이다⁴⁾.

교환력과 자기저항 연구에 있어서 박막의 결정성장 방향이 그 특성을 결정한다고 알려져있고, 또한 박막의 표면거칠기는 층간의 접촉면에 영향을 주므로 (111) 결정이방성과 표면거칠기가 NiO 보다 우수한 CoO를 이용하게 되었다⁵⁾. CoO는 Néel 온도가 293 K이며 이때문에 상온에서는 반강자성과 상자성의 특성이 혼재하는 물질이므로 CoO만으로는 반강자성층을 형성하기 힘든 것으로 알려져 있다⁶⁾. 그러나 격자상수나 결정구조가 NiO와 매우 유사하여 그 물리적 특성을 이용하여 NiO의 결정방향을 어느 정도 향상시킬 수 있을 것으로

* : 단국대학교 이과대학 응용물리학과

접수일자 : 1996년 11월 22일

심사완료 : 1996년 12월 18일

사료된다.

교환이방성을 지니는 박막에서의 자화거동은 이방성을 준 박막의 경우 인가자장과 이방성의 방향이 평행인지 또는 반평행인지에 따라 그 방향을 갖게 된다. 왼쪽의 방향으로 이방성을 준 경우 인가자장을 음의 최대 값에서 서서히 감소시키면 free layer의 경우 일반적인 자성박막과 같이 보자력에 의해서 0점을 지난 뒤 스핀들이 정렬상태가 서로 혼합되어 있으므로 저항이 증가하게 되고, pinned layer의 경우 이 보자력값보다 더 큰 자장이 인가되면 즉 교환력으로 결합된 에너지보다 더 큰 자장이 주어질 경우에만 스핀들의 정렬이 혼합됨으로써 기준점에서 일정한 크기만큼 이동된 값을 갖는다.^{7,8,9)}

본 연구에서는 위와 같은 CoO의 특성을 이용하기 위해서 바닥층으로 CoO를 성장시킨 후 NiO와 NiFe/Cu/NiFe 박막을 제작하여 비자성층과 강자성층의 두께에 따라 변하는 자기저항비, 반강자성층과 강자성층의 두께에 따라 변하는 교환력과 보자력 등에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

RF-sputtering법을 이용하여 절연체인 NiO와 CoO를 증착하였고, 도체인 NiFe와 Cu는 DC-sputtering법을 이용하였다. Chamber의 형태는 수평형태의 원통형으로써 RF와 DC가 모두 가능한 4-gun 형태이며 기판이 진공 중에 회전하면서 각각의 target 위에 머무는 시간과 증착률로써 박막의 두께를 결정할 수가 있다. Turbo-molecular pump(KYKY)와 rotary pump(A-tech)를 이용하여 3×10^{-6} Torr 까지의 초기진공도를 얻었고, 300 W RF-power supply와 1000 W DC-power supply로 박막을 제작하였다. 기판은 Corning 7059 glass를 이용하였으며, 이때 glass의 크기는 약 5 mm×10

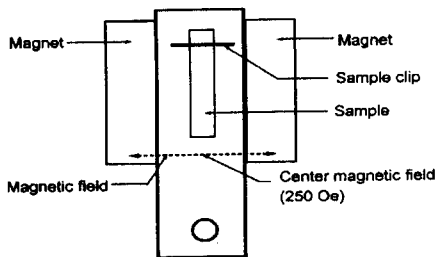


그림 1. 시료 장착 구조도
Fig. 1. The schematic diagram of the substrate holder

mm의 직사각형 형태이고, 그림 1과 같은 구조의 기판 holder에 자석을 장착하고 glass의 길이 방향과 수직하게 자장을 인가하여 반강자성체인 NiO와 CoO 층에 이방성을 주었다. 이때 자석 사이의 중심부에 glass를 장착하고 중심부에서의 이방성 크기는 250 Oe 임을 확인하였다.

박막의 증착은 5×10^{-4} Torr의 진공도에서 이루어졌으며, 그 때 Ar-gas의 주입은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 10 SCCM이 흐르도록 조정하였다. 두께 결정은 Sycon사의 STM-100/MF thickness monitor를 이용하였다. NiFe와 Cu의 증착률은 1 Å/sec으로 고정하였으며, CoO와 NiO의 증착률은 0.1 Å/sec ~ 0.2 Å/sec 으로 유지하였다.

박막의 구조는 [NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å-60Å}/NiFe_{60Å}]을 제작하여 CoO가 삽입되지 않을 때의 기준 시편을 제작하였고, 기준 시편이 제작된 후에는 CoO가 삽입된 두 종류의 시편들을 제작하였다. 그리고[CoO_{6Å-360Å}NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{16Å}/NiFe_{60Å}]을 제작하여 바닥층에 의한 영향을 관찰하였다.

자기 저항을 측정하기 위해서 HP 34401 A multimeter를 이용하여 4-wire method로 자기거동을 관찰하였다. H-field를 박막의 면과는 나란하고 이방성 방향과는 평행 또는 반평행하게 인가하고 그 크기를 -500 Oe ~ 500 Oe 까지 변화시키면서 저항의 변화값을 Gauss-meter와 multimeter로부터 읽을 수 있으며, 이때 저항 변화의 계산 값은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\Delta R}{R} = \left| \frac{R(0) - R(H)}{R(H)} \right| \times 100 (\%) \quad (1)$$

자기저항비가 큰 값과 작은 값을 갖는 시편들의 XRD 값을 비교하여 교환력과 자기저항에 가장 큰 영향을 주는 결정성장면을 찾아보고자 하였으며, CoO를 삽입함으로써 전체 박막에서 결정성장면의 우세방향을 고찰하였다.

박막의 표면거칠기 분석을 위해 AFM(atomic force microscopy)을 이용하였다. 3차원의 AFM 영상을 통하여 육안으로 쉽게 표면의 거칠기를 볼 수 있으며, Ave-rough(측정 시편의 평균 거칠기)를 통하여 좀더 세밀한 분석을 할 수 있다. 이러한 분석은 CoO를 바닥층으로 이용할 경우 표면거칠기 증가여부를 관찰할 수 있으며, CoO의 역할이 교환력과 자기저항비를 증가 또는 감소시키는지에 대하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 자기저항비를 이용한 교환력과 보자력

그림 2, 그림 3, 및 그림 4는 Cu의 두께를 변화시키면서 자기저항곡선과 자기저항비 그리고 interlayer coupling에 의한 교환력과 보자력을 계산하였다. Cu의 두께가 16 Å과 18 Å 일 때 자기저항비가 각각 4.496 %와 4.656 %로써 가장 크게 보여지고 있다. 이는 pinned layer와 free layer간의 interlayer coupling이 이미 알려져 있는 바와 같이 비자성층의 두께에 따라 반강자성 결합과 강자성 결합으로 주기적인 성질을 가지며 결합하기 때문에 자기저항비 또한 그에 따르는 특성을 보이고 있다. 즉 Cu의 두께가 16 Å에서 18 Å일 때 자성층들은 박막의 증착시 이방성을 준 방향과 반강자성적 interlayer coupling의 방향이 일치하여 더욱 강한 반강자성 결합을 갖게 되므로써 자기저항비가 가장 크게 측정되는 것으로 보여진다. 그리고 Cu의 두께가 다시 증가하게 되면 자성층들간의 interlayer coupling은 다시 강자성 결합으로 결합하여 자기저항비는 감소한다. 전반적인 시편에서 자기저항비는 1 % ~ 4 %를 보이고 있으며 두께가 증가할수록 interlayer coupling 자체가 약해지며 자기저항비 역시 서서히 감소하는 것을 볼 수가 있다. 또한 30 Å과 40 Å 사이에서 다시 peak 점이 나타날 것으로 예상이 되었으나 실험결과는 다르게 나타났다. 이는 상온에서 열에너지가 각각의 원자들에게 에너지를 제공하게 되므로써, 원자 배열이 방해받게 되어 interlayer coupling이 가장 강한 얇은 두께의 Cu 대역에서만 그 형태가 보이게 되는 것으로 해석된다. 교환력은 pinned layer의 경우 50 Oe에서 90 Oe 정도 보여지고 있으며 free layer의 경우는 20 Oe를 넘지 않는다. Cu의 두께가 30 Å을 넘게 되면 그 보다 얇은 두께에서와는 달리 교환력이 일정한 값을 갖는다. 주기적인 interlayer coupling이 영향을 미치지 않는 경우 pinned layer의 교환력은 Cu의 두께와 관계없이 반강자성체인 NiO와의 결합에만 의존하게 된다. 따라서 Cu의 두께가 증가할지라도 그 변화폭은 적게 측정된다. Free layer는 비자성층인 Cu의 두께만큼 NiO와 떨어져 있어서 pinned layer보다는 그 변동폭이 작은 반면에 Cu의 두께가 얇은 경우 강한 interlayer coupling의 영향이 free layer에 까지 영향을 주어 변화폭이 pinned·free layer 모두 큰 것을 알 수 있다.

교환력이 일정하게 측정되는 Cu의 두께가 30 Å 이상인 박막에서는 자기저항의 계단 형태가 비교

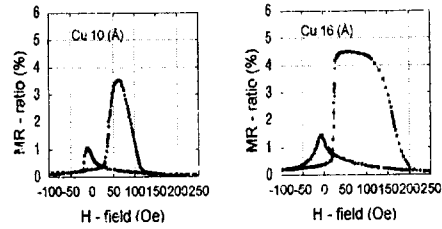


그림 2. NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}/NiFe_{60Å} and NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{16Å}/NiFe_{60Å} 박막의 자기저항곡선.

Fig. 2. The MR-curve in NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}~60Å/NiFe_{60Å} thin films.

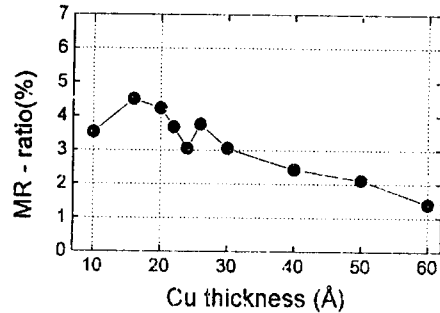


그림 3. NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}~60Å/NiFe_{60Å} 박막의 자기저항비.

Fig. 3. The exchange field and coercive field of pinned layer in NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}~60Å/NiFe_{60Å} thin films.

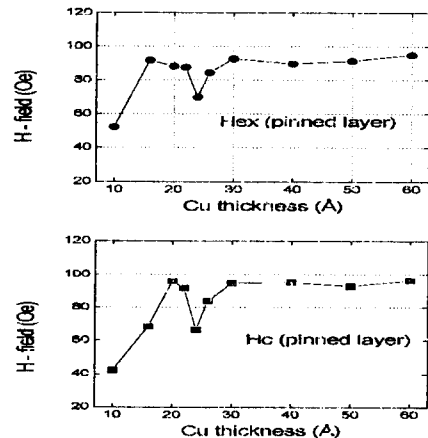


그림 4. NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}~60Å/NiFe_{60Å} 박막에서 pinned layer의 교환력과 보자력.

Fig. 4. The MR-ratio in NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{10Å}~60Å/NiFe_{60Å} thin films.

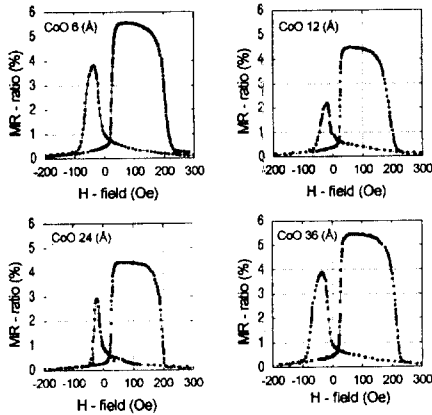


그림 5. $\text{CoO}_{6\text{Å} \sim 360\text{Å}}/\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{16\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ 박막의 자기저항 곡선.

Fig. 5. The MR-curve in $\text{CoO}_{6\text{Å} \sim 360\text{Å}}/\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{16\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ thin films.

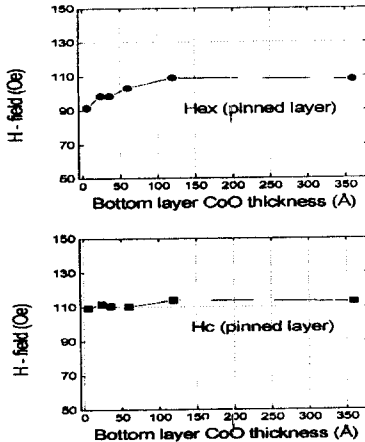


그림 6. $\text{CoO}_{6\text{Å} \sim 360\text{Å}}/\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{16\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ 박막에서 pinned layer의 교환력과 보자력.

Fig. 6. The exchange field and coercive field of pinned layer in $\text{CoO}_{6\text{Å} \sim 360\text{Å}}/\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{16\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ thin films.

적 안정적인 것을 볼 수 있다. 이 또한 앞에서 언급한 바와 같은 맥락에서 고찰할 수 있다.

보자력의 경우는 강자성층의 두께에 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 결국 이 실험에서도 NiFe의 두께가 일정함으로써 보자력값은 일정한 크기로 관찰되어야 한다. 그러나 Cu의 두께가 얇은 경우에는 변화가 크다는 사실을 알 수 있다. 즉 자성층들간의 interlayer coupling이 이 보자력에도 영향을 주는 것으로 보여진다.

그림 5와 그림 6은 $\text{CoO}_{6\text{Å} \sim 360\text{Å}}/\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{10\text{Å} \sim 60\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ 시편에서의 자기저항곡선, 교환력 및 보자력의 계산값이다. 선행된 실험의 경우 $\text{NiO}_{400\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}/\text{Cu}_{16\text{Å}}/\text{NiFe}_{60\text{Å}}$ 박막에서 자기저항비가 크고 계단 형태도 비교적 안정적이기 때문에 이를 CoO 바닥층 연구의 기준으로 이용하였다. 자기저항비가 약 1 % 정도까지 증가된 5.552 %를 CoO 6 Å이 바닥에 적층된 박막에서 얻게 되었다. CoO의 두께에 따라 교환력과 보자력이 변화하는 것을 볼 수가 있다. pinned layer의 경우 CoO의 두께가 증가함에 따라 그 변화폭이 함께 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 free layer의 경우 교환력나 보자력의 변화가 CoO의 두께에 따라 일정한 연관성을 갖지 못한다. Free layer의 경우 NiO와의 떨어진 거리로 인하여 미세한 영향이 미치기에는 부적절하다. 따라서 NiO와 접하고 있는 pinned layer의 변화를 관찰하면 자기저항비가 CoO의 바닥층 두께 6 Å과 24 Å사이에서 5 % 이상의 결과를 나타냈으나 교환력은 작은 값에서는 서서히 증가하고 CoO 두께가 더욱 증가할 경우 포화되는 형태를 보여주고 있다. 이는 얇게 CoO층을 증착하는 경우와 두껍게 CoO층을 증착하는 경우에 위와 같은 특성이 나타나는 원인이 결정성장 이방성 때문인지 혹은 표면의 거칠기 때문인지에 대한 고찰을 해 볼 수가 있을 것이다. 결과적인 면만을 보면 교환력 자체는 90 Oe에서 100 Oe 이상으로 증가한 것을 볼 수가 있다. 이는 CoO가 NiO의 성장에 영향을 주어 (111)면을 크게 성장시키거나 또는, 표면의 거칠기로 인해 접촉면을 증가시킬 수 있다. 이와 같이 교환력에 영향을 줄 수 있는 두 가지 요인에 대해서는 XRD와 AFM을 통하여 비교해 보았다.

3.2. XRD 분석

그림.7에서 두 가지 경향을 관찰할 수가 있다. 첫째 Cu의 두께가 10 Å인 박막에서는 앞의 자기저항곡선에서 보듯이 계단 형태가 사라지고 교환력과 자기저항비가 작다는 것을 볼 수가 있었다. 이와 관련하여 아래의 결과를 보면 NiO의 성장면이 (111) 보다는 (200)면이 더 우수한 것으로 나타난다.

Cu의 두께를 더 증가한 박막에서 NiO에 관한 성장면을 관찰하면 (111)면의 peak가 (200)면의 peak와 같은 값을 갖거나 또는 더 증가한 것으로 나타났다. 두 성장면의 peak 점들은 서로 비슷한 구조의 박막에서 교환력이 80 Oe에서 90 Oe 정도이고 자기저항곡선 역시 계단 형태를 갖고 있다.

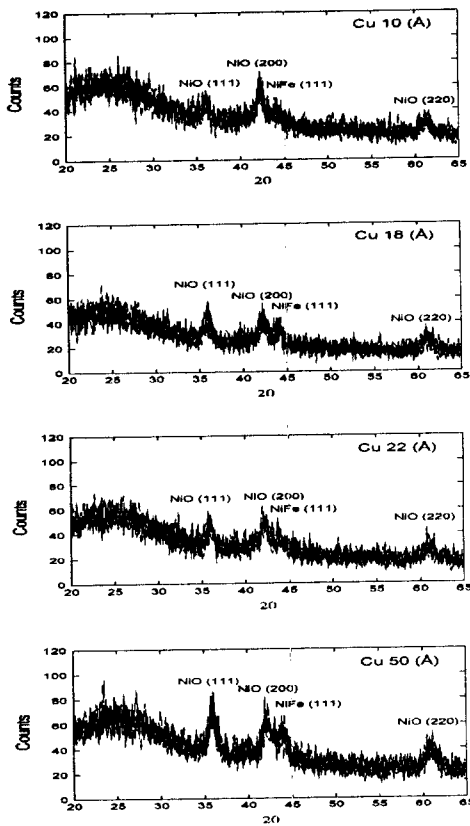


그림 7. NiO_{400A}/NiFe_{40A}/Cu_{10A~50A}/NiFe_{40A} 박막의 XRD data.

Fig. 7. The XRD data of NiO_{400A}/NiFe_{40A}/Cu_{10A~50A}/NiFe_{40A} thin film.

따라서 교환력가 가장 민감하게 영향을 주는 결정의 성장 방향이 (111)면 이라는 것을 알 수 있다. 두 번째 특징은 NiFe의 peak 점들에 관한 결과이다. Cu의 두께가 18 Å인 박막은 자기저항이 4% 이상이고 교환력 또한 90 Oe 정도로 측정되었다. NiO의 경우는 (111)면의 성장이 다른 어떤 막들보다 우수하게 나타났으나 NiFe에서 (111)면의 성장은 오히려 다른 막들보다 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 이는 NiFe의 (111)면 성장이 자기저항비의 증가나 감소에 직접적인 원인을 제공하지는 못하는 것으로 보여진다

CoO_{6A~360A}/NiO_{400A}/NiFe_{60A}/Cu_{16A}/NiFe_{60A} 박막에서는 그림 8과 같이 NiO만을 적층한 막의 peak 값이 오히려 더 크게 나타났다. 결국 이방성을 유도하기 위한 CoO의 삽입은 NiO의 성장에 방해가 되는 것으로 보여진다. 그러나 이러한 결과에도 불구하고 CoO를 이용한 막에서 자기저항비가 증가

한 것을 볼 수가 있으며 이는 곧 CoO의 표면거칠기의 영향을 고려하게 되었다.

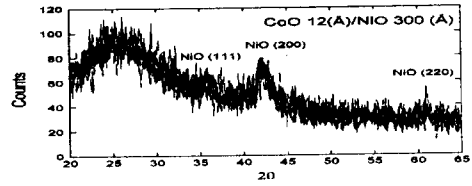


그림 8-(a). CoO_{12A}/NiO_{300A} 박막의 XRD data.
Fig. 8-(a). The XRD data of CoO_{12A}/NiO_{300A} thin film.

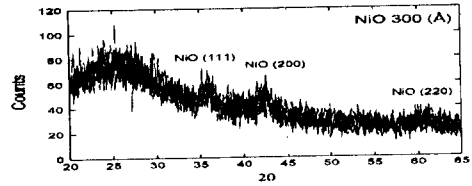
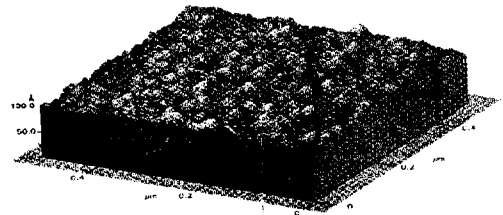
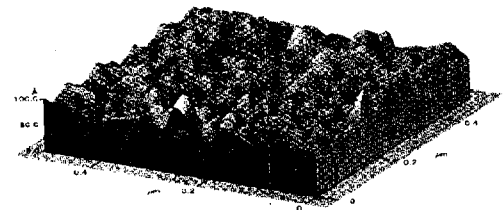


그림 8-(b). NiO_{300A} 박막의 XRD data.
Fig. 8-(b). The XRD data of NiO_{300A} thin film.

(a)



(b)



(c)

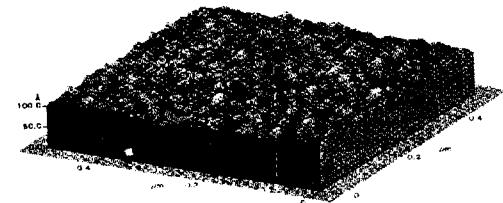


그림 9. (a) NiO_{300A} 박막, (b) CoO_{300A} 박막과 (c) CoO_{12A}/NiO_{300A} 박막의 AFM data.

Fig. 9. The AFM data of (a) NiO_{300A} thin film, (b) CoO_{300A} thin film and (c) CoO_{12A}/NiO_{300A} thin film.

3.3. 표면거칠기 분석

표면거칠기를 분석하기 위해 NiO, CoO 그리고 CoO/NiO 박막을 제작하였다. 그림. 9-(a)의 경우는 NiO 박막의 표면을 보여주고 있다. 각각의 측정단위는 모두 같으며 NiO의 경우 Ave-rough는 3.5 Å이며, (b)의 경우는 CoO 박막이며 Ave-rough는 6.1 Å으로써 NiO 보다 약 두배의 거칠기를 갖고 있다. (c)의 경우는 CoO/NiO의 구조를 갖는 박막으로써 순수한 NiO 만으로 적층된 박막보다 약 0.1 Å의 거칠기 증가를 볼 수가 있다. 결국 자기저항비의 증가 원인은 CoO의 결정성장이방성 보다는 표면거칠기의 증가에 의한 접촉면의 증가를 갖게 되고 이렇게 접촉면이 증가함으로써 결합력의 세기가 증가하는 것으로 보여진다. 따라서 본 실험을 통하여 CoO의 표면거칠기는 교환력의 증가와 자기저항의 증가에 매우 큰 영향을 주는 것으로 보여진다.

4. 결 론

NiO와 CoO를 이용한 반강자성 자기저항 박막을 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. NiO_{400Å}/NiFe_{40Å}/Cu_{10Å-60Å}/NiFe_{40Å} 박막을 제작하여 Cu 18 Å일 때 자기저항비 4.656 %을 얻었으며, 90 Oe 이상의 교환력을 측정하였다.
2. Cu의 두께 변화에 따라 interlayer coupling가 변하는 것을 확인하였으며, Cu의 두께가 24 Å일 때 경우 자기저항비는 3 %, 교환력은 70 Oe로 급격히 감소하는 특이점을 얻었는데. 이는 자성층들간의 결합형태가 강자성 결합 상태일 것으로 보여진다.
3. CoO_{6Å-360Å}/NiO_{400Å}/NiFe_{60Å}/Cu_{16Å}/NiFe_{60Å} 박막을 통하여 CoO 6 Å이 증착된 박막에서 자기저항비 5.552 %를 얻었고 교환력은 100 Oe 이상을 얻었다.
4. XRD 측정 결과 교환력은 (111)면의 성장이 우수하게 측정된 박막에서 크게 나타났으나, CoO 증착함으로써 (111)면 성장의 이방성이 나타나지는 않았다.
5. 자기저항비와 교환력의 증가에 가장 큰 영향을 주는 원인은 CoO가 갖고 있는 결정성장이방성 보다는 표면거칠기에 그 원인이 있는 것으로 보여진다.

※ 감사의 글

본 연구는 '96년도 단국대학교 교내연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Jack H. Judy et al, "Magnetoresistance Studies of NiCoO Exchange Biased Spin-Valve Structure", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 30, No. 6, 3834, November 1994
2. Y. Sugita et al, "Giant Magnetoresistance of Spin Valve Films with NiO Antiferromagnetic Films" Jpn. J. Appl. Mag., Vol. 18, No. 2, 355, 1994
3. Shin Noguchi et al, "Magnetoresistance and Preferred Orientation in FeMn/NiFe/Cu/NiFe Sandwiches with Various Buffer Layer Materials" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, No. 1A, 133, 1994
4. M.J.Carey and A.E.Berkowitz "CoO-NiO superlattices: Interlayer interactions and exchange anisotropy with Ni₈₁Fe₁₉ (invite)" J. Appl. Phys., Vol. 72(10). 6892. 15 May 1993
5. Timothy J. Moran and Ivan K. Schuller "Effect of Cooling Field Strength on Exchange Anisotropy at Permalloy/CoO Interfaces." J. Appl. Phys. Vol. 79 (8), 15 April 1996
6. Jun-ichi Ffujikata et al, "Magnetoresistance Effect in Spin-Valve Structures with CoO/NiO superlattices" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 31, No. 6, 3936, November 1995
7. T.Ambros and C. L. Chien "Magnetic Properties of Exchange Coupled NiFe/CoO/NiFe Trilayers" Appl. Phys. Lett, Vol. 65, No. 15, 1967, 10 October 1994
8. Chih-Huang Lai, Hideo Matsuyama, Robert L. White "Anisotropy Exchange for NiFe Films Grown on Epitaxial NiO" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 31, No. 6, 2609, November 1995
9. Thomas C. Anthony and James A. Burg "Magnetoresistance of Symmetric Spin Valve Structures" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 30, No. 6, 3819, November 1994

현준원

1960년 6월 6일생. 1985년 단국대학교 공대 물리학과 졸업. 1994년 형가리 부다페스트 공과대학교 물리학과 졸업(이학박사). 1992년-94년 부다페스트 공대 신소재연구소 근무. 현재 단국대학교 응용물리학과 전임강사.

