

## NiFe/Cr 다층박막의 층수와 자기이방성에 따른 자기저항특성

황도근 · 이상석

상지대학교 이공과대학 물리학과  
강원도 원주시 우산동 산41

박창만 · 이기암

단국대학교 자연과학대학 물리학과  
충남 천안시 안서동 산29

(1995년 3월 21일 받음, 1995년 6월 30일 최종수정본 받음)

Glass\Cr<sub>40Å</sub>\[Cr<sub>10Å</sub>\NiFe<sub>50Å</sub>]<sub>N</sub> 다층박막을 층수  $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10$ 에 따라 dc magnetron sputtering 방법에 의해 제작하였다. 이때 자기 이방성의 형성을 위해 제작 중에 자장을 200 Gauss 가했다. 전류 방향과 외부 자장이 수평, 수직에 따라 자기저항 곡선  $MR(xx)$ ,  $MR(xy)$ 를 조사하였다.  $MR(xx)$  곡선의 경우  $N = 1, 5, 10$  경우 자기저항비가 거의 나타나지 않았으며, 나머지 층수의 경우는 외부 자장에 따라 저항이 증가하는 positive magnetoresistance 현상을 보였다. 또한 곡선의 모양도  $H = 0$  Oe 근처에서 특이하게 반전되는 자기저항 곡선을 보였다. 이런 현상의 물리적 해석을 NiFe 단층박막의 자기저항 곡선과 비교하여 설명하였다.

### I. 서 론

지난 몇 년 동안 자기저항 현상은 다양한 자성 다층 박막구조에서 발견되어, 자기 기록과 센서에 대한 응용적인 면과 이론적 해석에 대해 관심이 집중되어 왔다. 특히 10 KG이상의 큰 자기장에서 거대 자기저항(Giant Magnetoresistance) 현상을 보이는 반강자성적 박막구조(Antiferromagnetically coupled multilayer, AFM)에 대한 인공 초격자 연구는 많은 연구가 진행되고 있다 [1].

1988년 Baibich 등에 의해서 Fe/Cr 인공 초격자에서 자기저항 변화가 4.2 K, 20 KG에서 100 % 정도의 거대 자기저항을 처음 발견한 이후 [2], GaAs(100), Ge(100), MgO(100) 등의 기판위에 sputtering 방법으로 4.2 K에서 150 %의 자기저항 변화를 발표하고 있다 [3]. 또한 상온에서 60 % 이상의 GMR 현상을 보이는 Co/Cu 인공초격자에 관한 연구도 집중적으로 연구되어 4.2 K에서 115 % 정도의 자기저항 변화가 발표되고 있다 [4, 5]. NiFe/Cu의 인공초격자에 관한 연구도 많이 발표되고 있는데, 그 이유로는 Fe/Cr, Co/Cu 인공초격자는 큰 포화 자장과 자기 이력 곡선으로 낮은 자장에서의 응용에 제한을 주는 반면 NiFe/Cu 초격자는 포화 자장을 줄이고 자기 이력이 거의 없으므로 강점을 갖는다 [6].

이런 다층 박막의 공통된 특징은 얇은 자성층들이 비자성층에 의해 분리된 형태로 존재하는데, 이 구조의 저항은 연속적인 자성층의 자화방향과 밀접한 관련이 있다. 즉 외부의 자장이 가해지지 않았을 경우에는 이웃한 자성층의 자화가 반대 방향을 이루며, 외부의 자장에 의해 같은 방향이 된다. 이와 같이 자성층의 자화 방향 변화는 자유전자의 스핀방향과 상호작용(Spin dependence scattering)하여 평균자유행로의 차이를 유발시켜 저항의 변화를 가져온다 [1, 7]. 지금까지 발표된 대부분의 AFM 박막구조는 거의 외부 자장을 가하면 전류의 방향과 관계 없이 저항이 줄어드는 negative magnetoresistance 현상을 보였다. 그러나 NiFe/Cr 다층박막의 경우에는 자기저항의 변화가 매우 작으면서, 전류의 방향이 외부 자장의 방향과 같은 방향일 때 외부 자장을 가함에 따라 저항이 증가하는 positive magnetoresistance 현상을 보인다 [8]. 이에 대한 연구는 자기저항의 변화율이 적은 이유로 관심을 보이지 못하고 있으나, AFM 박막구조의 이론적 해석인 spin dependence scattering에 대한 다양한 고찰을 위해 필요하다.

본 연구에서는 NiFe/Cr 박막의 다층구조의 층수에 따른 자기저항 변화를 전류 방향과 외부 자장의 방향이 서로 수직과 수평일 때에 대해 고찰했으며, 이에 대한 해석을 위해 NiFe 단층박막을 제작하여 자기이방성 여부에 따라 자기저항 곡선의 변화를 비교하여 설명하였다.

## II. 실험 방법

NiFe /Cr 다층박막을 제작하는데 사용한 dc sputtering 장치는 fig. 1에서 보여주고 있다. 원통형 chamber에 타겟을 서로 마주보게 했으며, 플라즈마가 서로 간섭하는 것을 방지하기 위해 중간에 분리막을 설치했고, 기관은 중간에서 회전하게 되어 있다. 자성층과 비자성층의 확실한 분리를 위해 기관에 가리개를 하였다. 초기 진공도는  $1 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 유지하였으며, 스퍼터링시 아르곤 압력은  $4 \times 10^{-4}$  Torr로 고정시켰다. 기관은 Corning glass 7059를 세척하여 사용했으며, NiFe /Cr 다층박막을 구성하기 전에 바닥층을 50 Å을 먼저 형성하였다. NiFe와 Cr의 증착속도는 1 Å /sec을 유지했으며, 자기 이방성을 주기 위해 기관의 면에 평행하게 자장을 200 Gauss 가했다.

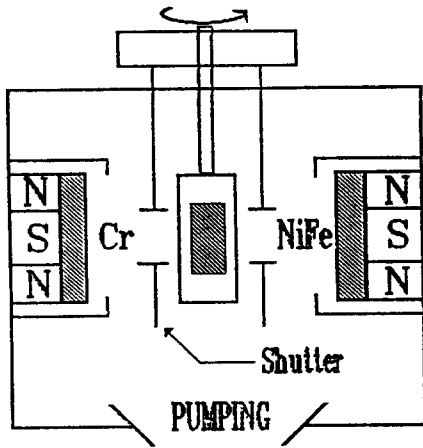


Fig. 1. Small angle XRD pattern in glass[Cr<sub>6A</sub>NiFe<sub>12A</sub>]<sub>40</sub> multilayers

다층박막의 구조는 glass\Cr<sub>40A</sub>\[Cr<sub>10A</sub>\NiFe<sub>50A</sub>]<sub>N</sub>로 층수를 변화하였다. 외부 자장에 따른 자기저항 곡선을 구하기 위해 상온에서 4단자 저항 측정법을 사용하였으며, 자기저항은  $MR \% = [R(H=0) - R(H_s)] / R(H_s)$ 로 정의하였다. 여기서  $R(H_s)$ 은 포화 자장에서의 저항 값이다.  $MR(xx)$ 는 시편 면에서 외부 자장, 자기 이방성, 전류의 방향이 모두 같은 방향일 때의 자기저항 값이며,  $MR(xy)$ 는 자기 이방성과 전류의 방향이 같은 방향이고 외부 자장이 수직인 방향일 때의 자기저항 값이다.

Fig. 2는 NiFe /Cr 다층박막의 중간 구조를 확인하기 위해 glass[Cr<sub>6A</sub>NiFe<sub>12A</sub>]<sub>40</sub>의 시료를 제작하여 소각

회절선 (low angle XRD)을 3~10° 사이에서 측정한 것이다. 이 결과에 의하면 4.936°에서 첫 피크가 나타났으며, 두 번째 피크도 10° 근처에서 약간 발생한 것으로 봐서 적층구조는 양호한 상태인 것으로 고려할 수 있다.

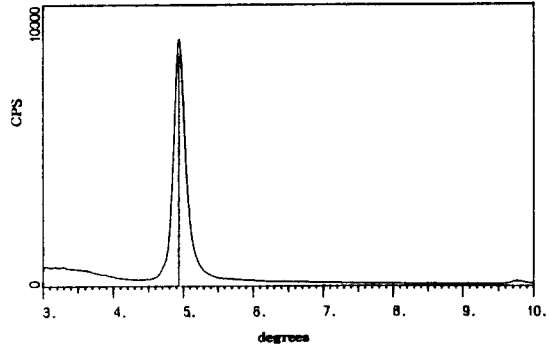


Fig. 2. Diagram of magnetron sputtering system

## III. 결과 및 토의

Fig. 3(a)-(g)은 glass\Cr<sub>40A</sub>\[Cr<sub>10A</sub>\NiFe<sub>50A</sub>]<sub>N</sub> 다층박막의 층수에 따른 자기저항 곡선을 보여준다. 층수  $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10$ 에 따라 전류의 방향과 외부 자장의 방향이 수평인 자기저항  $MR(xx)$ 과 수직인  $MR(xy)$ 를 조사하였으며, 이때 자기 이방성의 방향은 전류의 방향에 일치하며, 자기 이방성을 형성하기 위한 외부 자장을 200 Gauss 가했다. Fig. 3(a)의  $MR(xx)$ 는 거의 변화가 나타나지 않았으며, 수직 방향의 자기저항 역시 0.21 %를 보이고 있다. 이 시편은 50 Å NiFe의 단층박막으로 외부로부터 자기이방성 자장을 가하지 않을 경우에는  $MR(xx) = -0.21 \%$ 의 값을 보였다. 즉 자기 이방성 부여에 의해 수평 방향의 자기저항이 감소했다. Fig. 3(b)에 결과는 50 Å NiFe이 2층으로  $MR(xx) = -0.45 \%$ 와  $MR(xy) = 0.6 \%$ 로 증가하였으며, 자기저항의 포화자장값 역시 증가되었음을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 NiFe이 3층으로 매우 특이한 자기저항 곡선을 보이고 있다.  $MR(xx) = -0.45 \%$ 와  $MR(xy) = 0.6 \%$ 로 fig. 3(b) 경우와 자기저항 값은 거의 같으나 포화자장값이 60 Oe 정도로 증가했으며,  $MR(xx)$  곡선의 경우  $H = 0$  Oe 근처에서 반전되는 특이한 곡선을 보이고 있다. 이 반전되는 현상은  $MR(xy)$  곡선 경우에도 영향을 주어 자기저항 변화가 둔화되는 모양을 이루나 수평 방향의 자기저항 곡선  $MR(xx)$  처럼 반전되지는 않았다. Fig. 3(d) 경우는 NiFe 층이 4층으로  $MR(xx) =$

- 0.4 %,  $MR(xy) = 0.6$  %로 3층과 거의 비슷한 자기 저항 값을 보이고 있으며, 포화자장값 역시 60 Oe 정도로 거의 비슷하다. 단지  $MR(xx)$  곡선의  $H = 0$  Oe 근처에서 반전되는 모양이 다소 다른 모양을 보이고 있다. Fig. 3(e)의 경우는 NiFe이 5층으로 자기저항이 급격히 변화하여,  $MR(xx) = 0$ ,  $MR(xy) = 0.35$  %로 감소하였으며, 포화자장값 역시 10 Oe 이하로 감소하였다. 이는 Fig. 3(a)의 NiFe 단층의 결과와 거의 비슷하였다. 결과의 의외성이 실험 중의 오류에 의한 것인가를 확인하기 위해, 재실험한 결과 앞의 결과와 같은  $MR(xx) = 0$  %,  $MR(xy) = 0.33$  %의 결과를 보였다. Fig. 3(f) 결과는 NiFe 층이 6층으로  $MR(xx) = -0.59$  %,  $MR(xy) = 0.9$  %의 높은 결과를 보였으며, 포화 자장이 60 Oe로 증가하였으며,  $MR(xx)$  곡선의  $H = 0$  근처에서 반전되는 모양은 생기지 않았다. Fig. 3(g)는 NiFe 층이 10층으로 Fig. 3(a), (e)와 같은  $MR(xx) = 0$ ,  $MR(xy) = 0.22$  %로 감소하였으며, 포화자장값 역시 10 Oe 이하로 감소하였다.

Fig. 3의 자기저항 곡선들의 특징을 보면 수평 방향의 자기저항인  $MR(xx)$  경우 NiFe 자성층이 1, 5, 10층일

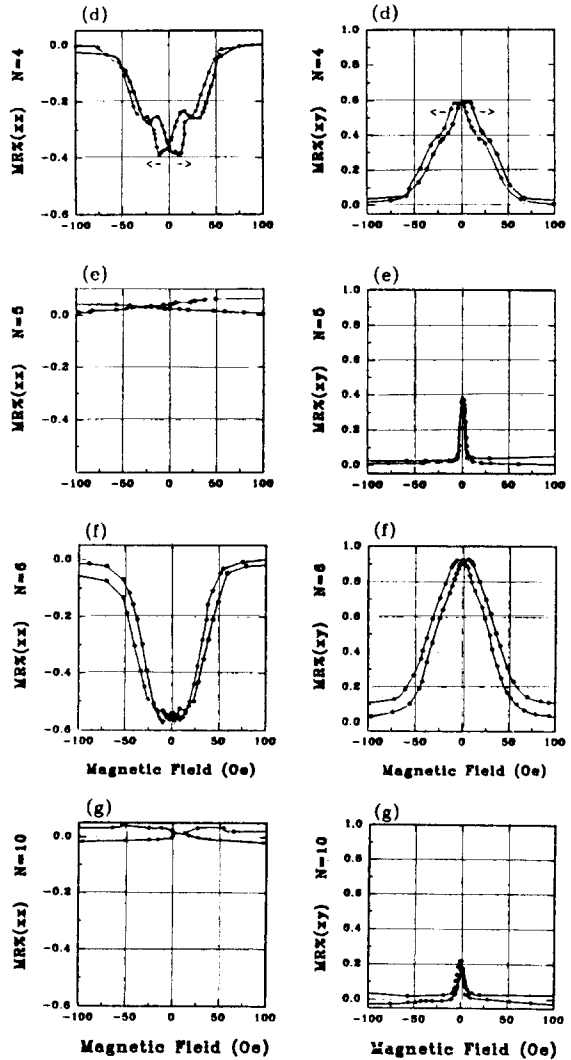
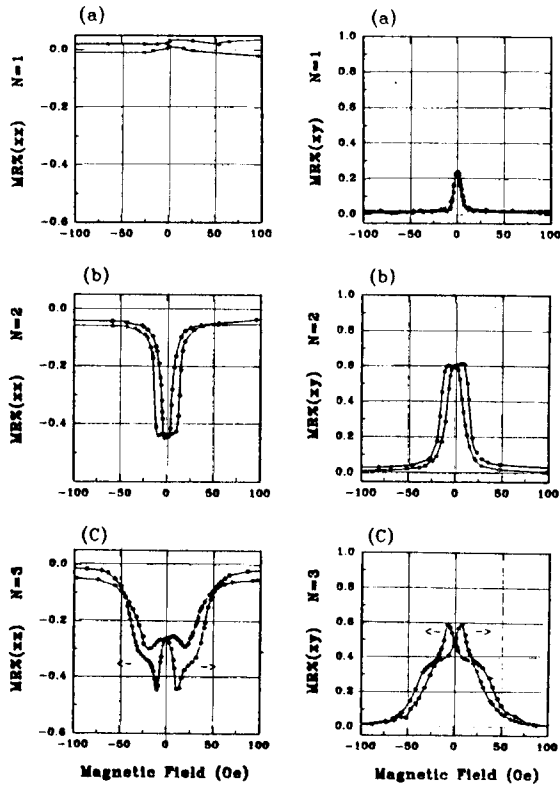


Fig. 3. Magnetoresistance curves for parallel and perpendicular direction to external magnetic field with the number of layers in glass/Cr<sub>40A</sub>/[Cr<sub>10A</sub>/NiFe<sub>50A</sub>]<sub>N</sub> multilayers,  $MR(xx)$  and  $MR(xy)$  respectively. (a) N = 1, (b) N = 2, (c) N = 3, (d) N = 4, (e) N = 5, (f) N = 6, (g) N = 10.

때 거의 변화 없이 나타나지 않았으며, 2, 6층의 경우에는 외부 자장의 증가에 따라 positive magnetoresistance 현상을 보여주고 있다. NiFe 자성층이 3, 4인 경우에는 포화자장값이 50 Oe보다 커지면서 자기저항 곡선의 중앙 부분에서 반전되는 특이한 모양을 나타낸다. 이와 같은 반전 현상은 NiFe/Cr 다층박막에 대한 Watson의 연구

결과에서도 발표되었는데, NiFe 자성층이 3층, 4층일 때 수평 방향에 대한 자기저항 곡선이 반전됨을 보이고 있다 [9]. 그 결과에 대한 해석은 자성층의 수에 따라 내부에너지의 최소화를 찾아 자기저항 곡선을 예측하고 있다 [9, 10]. 그리고 반강자성적 결합에도 불구하고 거대 자기저항 현상이 나타나지 않는 결과에 대해서는 Fe/Cr 다층박막과는 다르게 NiFe/Cr 박막의 경계면에서 전자의 산란이 spin-up 전자에 대하여 매우 크고, NiFe 박막에서는 상대적으로 작아서 거대 자기저항 현상이 나타나지 않는 것으로 설명하고 있다. 그러나 위의 실험 결과에 대한 설명에도 불구하고, 본 연구의 결과 중에 특히 설명하기 어려운 부분은 NiFe 자성층이 1, 5, 10층일 때 자기저항 변화가 거의 나타나지 않는다는 점이다. 10층까지 결과만

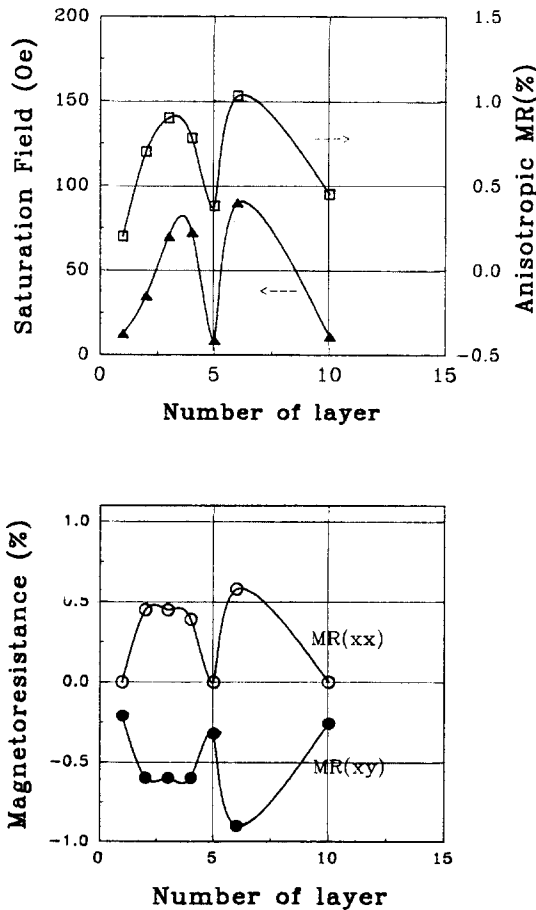


Fig. 4. Magnetoresistance ratio, anisotropic magnetoresistance and saturation field of magnetoresistance curve with the number of layers. (○)  $MR_{xx}$ , (●)  $MR_{xy}$ .

으로 주기적인 현상으로 볼 수는 없으므로 앞으로 계속적인 실험에 의해 고찰할 필요가 있다.

Fig. 4는 층수에 따른 자기저항 변화와 AMR(anisotropic magnetoresistance) 그리고 자기저항의 포화자장 값을 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 다층박막의 층수를 증가함에 따라 자기저항 변화율이 증가하지 않고, 주기적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

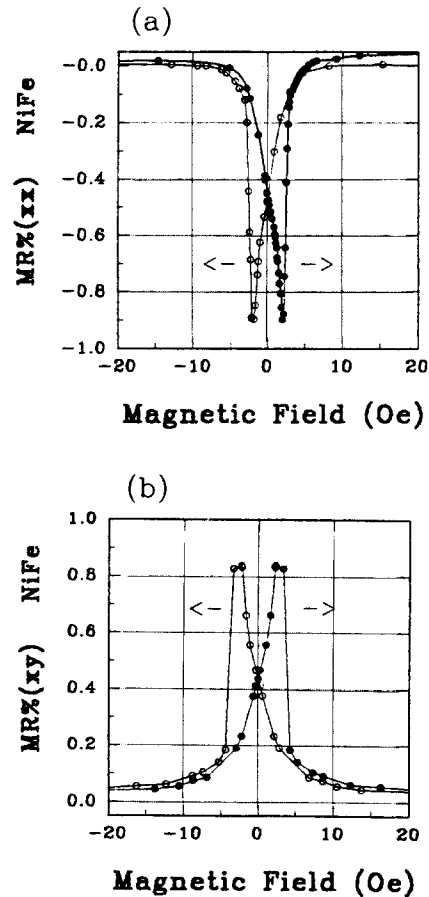


Fig. 5. Magnetoresistance curves for parallel and perpendicular direction to external magnetic field in glass/Cr<sub>50A</sub>/NiFe<sub>480A</sub>. (a)  $MR_{xx}$ , (b)  $MR_{xy}$ .

Fig. 5는 자기 이방성을 가하지 않은 NiFe 단층박막으로 전류 방향에 수평, 수직에 대하여 자기저항 곡선을 보여주고 있다. 수평, 수직 방향의 자기저항 변화율의 절대 크기는 서로 비슷하며, 곡선의 모양은 서로 반대의 모양을 갖는다. 자기저항 곡선의 포화 자기장은 자기 이방성을 가했을 때에 비하여 상당히 적은 5 Oe 정도의 값을 보

이고 있다. 또한 fig. 3 (c)의 경우처럼 반전되는 자기저항 곡선을 볼 수 없다. 이에 대한 물리적 해석은 Smit's model [11]의 자성박막의 격자와 자유전자의 스핀 사이의 상호작용에 의한 spin-orbit coupling에 의하여 설명할 수 있는데, s 전자가 전자궤도 평면에 수직하게 움직일 때 격자의 진동이나 결합에 의하여 발생하는 섭동에너지의 영향하에서 s 전자가 d 상태로 jump할 수 있는 가능성이 상당히 적다. 그러나 자화방향에 수직한 궤도에는 약간의 hole이 있기 때문에 s 전자는 자화방향에 수직보다는 수평 방향으로 움직일 때 더욱 쉽게 잡히게 된다. 그러므로 저항은 외부 자장에 대하여 수평 방향으로 전류를 흘려 보내는 경우 수직 방향보다 크다.

Fig. 5의 시편은 자기 이방성을 가하지 않은 glass\Cr<sub>50A</sub>\NiFe<sub>480A</sub> 박막이므로 표면의 자기구역의 모양이 제멋대로 발생할 것으로 생각된다. 그러므로 전류의 방향으로 평행하게 외부 자장을 가하면 자화방향이 전류 방향으로 정렬하기 때문에 전류 방향의 자구가 많아지면서 전체 저항은 증가하게 된다. 결국 fig. 5의 (a)처럼 곡선의 모양을 이루게 된다. 반대로 전류의 방향과 외부 자장의 방향이 수직하게 되면 자장을 가하지 않았을 때 자구들이 제멋대로 되어 있다가 외부 자장의 방향으로 정렬하므로 전류의 방향과 자화방향이 서로 수직인 자구들이 증가하여 fig. 5의 (b)처럼 전체 저항 값이 감소한다.

그러나 fig. 3의 경우처럼 자기 이방성을 가하면서 다층박막으로 형성하면 외부 자장을 가하지 않아도 자구의 방향이 대체로 정렬된 이방성을 가지게 되므로, 자기 이방성을 가하지 않은 경우보다 자성층은 서로 반대 방향의 자화를 이루는 반강자성적 결합 형태가 조금 더 강하게 나타날 것이다. 그러므로 이방성을 갖는 다층박막을 외부 자장에 대하여 수평 방향으로 전류를 흘려 보낼 경우, 자성층 사이의 자화가 반평행적 상태에서 평행 상태로 변화하는 거대 자기저항 현상의 기본적 구조를 가져야 한다. 이런 자화의 반전에 의한 거대 자기 현상에서는 거의 모든 다층박막의 자기저항이 외부 자장의 증가에 따라 저항이 감소하는 negative magnetoresistance 를 보이고 있다[1, 6]. 그러나 fig. 3의 수평 방향 자기저항 변화를 보면 자장의 인가에 따라 오히려 저항이 증가한다. 이런 정반대의 현상은 확실히 설명할 수는 없으나 대략 NiFe/Cr 다층박막의 경계면에서 전자의 spin dependent filtering 현상으로 설명해 보고자 한다. 즉 Ni내에 Fe impurity 형태의 금속, 즉 NiFe에서 spin-up, spin-down 전자의 잔류 비저항은 대략 0.4, 6.0  $\mu\Omega$  cm이다. 그러나 Ni내에 Cr impurity 경우 22, 6.5  $\mu\Omega$  cm으로 증가한다[12]. 그러므로 NiFe와 Cr층 사이의 경계면에서

spin-up 전자의 저항은 NiFe층에서 보다 매우 크므로 경계면에서 모두 산란되어 AFM 결합구조를 가지고 있어도 spin dependent scattering이 발생하기 어렵다. 결국 외부 자장의 증가에 따라 NiFe층들이 평행한 자화가 되어도 경계면에서의 큰 산란으로 다층박막의 효과에 의한 negative magnetoresistance를 보이지 못하며, 단지 NiFe층들 사이의 자화에 서로 영향만을 줄 것으로 생각된다. 그러므로 NiFe/Cr 다층박막에서의 자기저항 곡선은 NiFe 단층박막의 자기저항 특성처럼 다층박막의 각 NiFe층들이 전체적으로 positive magnetoresistance 현상을 보일 것이다. 그러나 다층박막의 경우는 단층박막과는 다르게 각 NiFe 자성층들이 자기구역(magnetic domain)의 형성과 자화과정중의 상호 간섭에 의해 특이한 반전되는 자기저항곡선을 유도하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 본 연구에서 설명하기 곤란한 점은 다층박막의 층수에 따라 자기저항곡선의 차이가 큰점과 N=1, 5, 10에서 자기저항변화가 나타나지 않은 점이다. 이에 대한 설명을 위해서는 추가적인 실험을 통해 재조명해볼 필요가 있다.

## VI. 결 론

DC magnetron sputtering에 의해 만들어진 glass\Cr<sub>40A</sub>\[Cr<sub>10A</sub>\NiFe<sub>50A</sub>]<sub>N</sub> 다층박막을 층수 N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 10에 따라 전류의 방향과 외부 자장의 방향이 수평인 자기저항 곡선 MR(xx)과 수직인 MR(xy)를 조사하였다. 이때 자기 이방성의 방향은 전류의 방향과 일치하며, 자기 이방성을 형성하기 위한 외부 자장을 200 Gauss 가했다. MR(xx) 곡선의 경우 N=1, 5, 10 경우 자기저항비가 거의 나타나지 않았으며, 나머지 층수에 따라서는 외부 자장에 따라 저항이 증가하는 positive magnetoresistance 를 보였다. 또한 곡선의 모양도 H=0 Oe 근처에서 반전되는 특이한 자기저항 곡선을 보였다. 이런 현상에 대한 설명은 지금까지의 거대 자기 현상으로 설명할 수 없으며, 앞으로 지속적인 연구를 통해 접근해 볼 필요가 있다고 생각된다.

## Reference

- [1] B. Dieny, J. Magn, Magn, Mater. 136, 335 (1994).
- [2] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Peyroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas,

- Phys. Rev. Lett., 61(21), 2472 (1988).
- [3] E. Fullerton, M. J. Conover, J. E. Mattson, C. H. Sowers and S. D. Bader, Appl. Phys. Lett. 63, 1699 (1993).
- [4] D. H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P. A. Schroeder, W. P. Pratt and R. Loloé, J. Magn. Magn. Mater. 94, L1 (1991).
- [5] S. S. Parkin, R. Bhadra and K. P. Roche, Phys. Rev. Lett. 66, 2152 (1991).
- [6] R. Nakatani, T. Dei, Y. Sugita : Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1417 (1992).
- [7] S. S. Parkin, Z. G. Li, D. J. Smith, Appl. Phys. Lett., 58(23), 2710 (1991).
- [8] S. S. Parkin, Appl. Phys. Lett., 63(14), 1987 (1993).
- [9] M. L. Watson, W. D. Doyle, H. Fujiwara, S. Hossain, J. Appl. Phys. 73(10), 5518 (1993).
- [10] B. Dieny, J. P. Gavigan, and J. P. Rebouillat, J. Phys. Condens. Matter 2. 159 (1990).
- [11] J. Smit, Physica XVI, 612 (1951).
- [12] I. A. Campbell and A. Fert, in Ferromagnetic Materials vol. 2, edited by E. P. Wohlfarth (North-Holland, Amsterdam, 1982).

## The Magnetoresistance effects of number of layers and magnetic anisotropic in [NiFe/Cr] Multilayers

D. G. Hwang, S. S. Lee

*Department of Physics, Sangji University*

*202-702 san 41, woosandong, wonju*

C. M. Park, K. A. Lee

*Department of Physics, Dankook University*

*330-714 san 29, anseodong, cheonan*

(Received 21 March 1995, in final form 30 June 1995)

Glass/Cr<sub>40Å</sub>[Cr<sub>10Å</sub>NiFe<sub>50Å</sub>]<sub>N</sub> multilayers (number of layer N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10) were made by dc magnetron sputtering under magnetic anisotropy of 200 G. Magnetoresistance curve MR(xx), MR(xy) were measured for the parallel and perpendicular current direction to external magnetic field. MR(xx) curves for the number of layer N=1, 5, 10 were almost became about zero percent, however the curves of other numbers appeared the phenomena of "positive magnetoresistance" that the resistance increased to external magnetic field, and the irregular and reversed curves in the vicinity of H=0 Oe.