

면내 일축 이방성을 갖는 GMR 금속다층막의 형성

송용진 · 김형준 · 이병일 · 주승기

서울대학교 공과대학 재료공학부

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

(1996년 6월 28일 받음, 1996년 10월 15일 최종수정본 받음)

Cu/(NiFe/Ni/NiFe) 금속다층막을 Si(100), Si(111), 4° tilt-cut Si(111), slide glass 등의 기판 위에 형성하여 자기저항 특성 및 자기이방성을 고찰하였다. 50 Å의 Cu를 바닥층으로 사용한 경우 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서 면내 일축 자기이방성을 보였으며 다른 기판 위에서는 자기이방성을 보이지 않았다. 바닥층이 없는 경우나 NiFe, Ni 등을 바닥층으로 사용한 경우 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서 자기이방성은 나타나지 않았으며, Cu 바닥층을 증착하기 전 NiFe를 10 Å 증착하고 형성한 금속다층막의 경우도 면내 자기이방성이 나타나지 않았다.

I. 서 론

자성체에 있어서 자기이방성은 결정구조, 모양, 응력이나 박막의 경우 증착 도중에 인가한 자장 등에 의해서 나타나며[1], 이러한 자기이방성은 AMR(Anisotropic Magnetoresistance) 소자[2], MRAM(Magnetoresistive Random Access Memory)[3], Magneto-Optics[4] 등에 응용된다.

거대자기저항(GMR, Giant Magnetoresistance)을 보이는 금속다층막에 있어서 우선방위와 자기이방성의 변화는 기판의 종류, 바닥층의 종류와 두께, 사잇층의 두께 등에 영향을 받는다. Si(100) 기판과 Cu 바닥층 위에 형성한 Co/Cu의 경우 (100) 우선방위와 이축이방성을 보이며[5], NiFe/Cu 금속 다층막의 경우는 Fe 바닥층의 증착 조건과 두께에 따라서 우선방위와 이방성이 바뀌는 것으로 알려져 있다[6]. 또한 Nakatani 등은 NiFe/Cu에 있어서 사잇층 Cu의 두께가 바뀌에 따라 (100) 우선방위와 (111) 우선방위가 진동한다고 보고하였다[7]. MgO(110) 기판 위에 형성한 NiFe/Cu 금속 다층막의 경우는 (110) 우선방위와 일축이방성을 보이는 것으로 알려져 있다[8].

본 연구에서는 Co나 Fe보다 낮은 포화자장과 자기이력을 갖는 NiFe를 기본으로 한 Cu/(NiFe/Ni/NiFe) 금속다층막에 있어서 기판과 바닥층을 변화시켜 가며 자기저항특성과 자성특성에 관해 연구하였다.

II. 실험 방법

R. F. 3-gun magnetron sputtering system을 이용하여 $[Cu(x \text{ \AA})/(NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA}))_n]$ 구조의 시편을 기판과 바닥층을 변화시켜 가며 증착하였

다. 기판으로는 slide glass, Si(100), Si(111), 4° tilt-cut Si(111) 등이 사용하였으며 Si 기판의 경우 박막 증착 전 불산을 이용하여 기판 표면의 자연산화막을 제거하였다. 바닥층으로는 Cu, Ni, NiFe, Cu/NiFe(10 Å의 NiFe층을 기판 위에 먼저 증착) 등이 사용되었다. 각각의 바닥층의 두께는 50 Å이었다. 금속다층막과 바닥층은 2 mTorr에서 증착되었으며 각 원소의 증착속도는 1~3 Å/sec이었다. 적층수(n)는 10 또는 20으로 하였다. 증착 도중 자장은 인가하지 않았으며 시편은 상온으로 유지하였다. 결정 구조 분석을 위해 XRD와 TEM을 사용하였으며 VSM을 이용하여 자기적 특성을 평가하였고 VSM의 전자석과 4 단자법을 이용하여 자기저항 특성을 측정하였다. 모든 측정은 상온에서 행하였다.

III. 결과 및 검토

Fig. 1에는 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 50 Å의 구리 바닥층을 증착하고 형성한 $[Cu(21 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA}))_{10}]$ 금속다층막의 자기저항 곡선을 면내에서 인가한 자장의 방향에 따라 나타내었다. 면내에서 일축 자기이방성을 나타내었으며 자화용이축으로 자장을 가한 경우는 자장에 따라 저항이 급격히 변했으며 자기저항 곡선이 계단형으로 변하였다. 자장을 자화근란축으로 가한 경우는 자기저항 곡선에서 step이 사라졌다.

Fig. 2에는 일축이방성을 보이는 재료에 자화용이축으로 자장을 가한 경우의 자화곡선과 자기저항곡선을 함께 나타내었다. 자기저항곡선에서 자장에 따라서 저항이 변하지 않는 부분은 자화곡선에서도 자화량이 변하지 않는 것을 알 수 있으며 이에 따라 자기 저항곡선에서의 step은 자장에 따른 자화가 변화하지 않는 영역에 의해서 발생됨을 알 수 있다. 이와 같이 자장의 변화에도 자화가 변

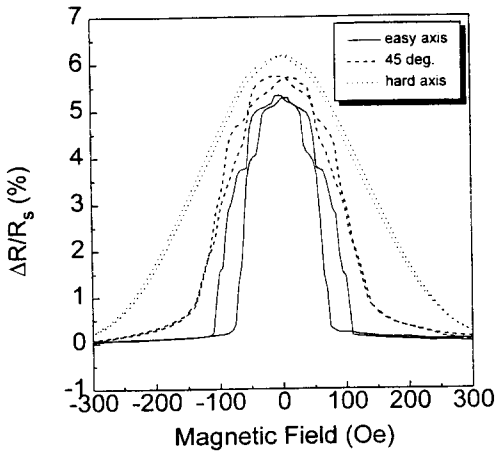


Fig. 1. R-H(Resistance-Magnetic Field) curves of $[Cu(21 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10} | Cu(50 \text{ \AA})$ on 4° tilt-cut Si(111) with respect to the applied magnetic field.

하지 않는 것은 금속다층막이 일축이방성을 갖는 이유로 인가된 자장에 따라서 각 자성층의 spin이 자화용이축방향으로 정렬한 상태에서 사잇층을 두고 서로 반대 방향으로 반강자성적 결합을 하는 상태로 천이되는 것이 두 상태의 중간상태인 자장에 따라서 spin의 정렬 상태가 흐트러져서 자화가 서서히 변화하는 것보다 에너지적으로 안정하기 때문에 발생한다. 이러한 자기저항 곡선에서의 step은 MgO(110) 기판 위에 형성한 CoFe/Cu나 NiFe/Cu 경우에도 자화용이축(MgO기판의 [100] 방

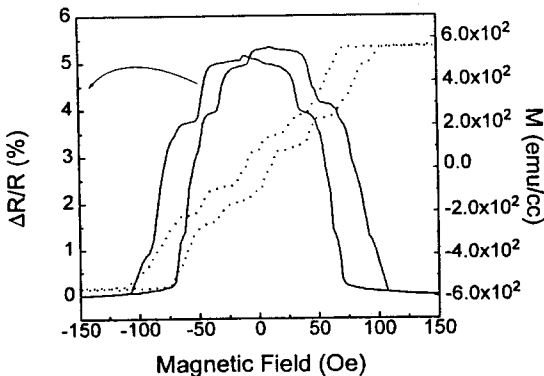


Fig. 2. R-H and M-H(Magnetization-Magnetic Field) curves of $[Cu(21 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10} | Cu(50 \text{ \AA})$ on 4° tilt-cut Si(111) when magnetic field was applied along the easy axis($H_s // Si \langle 112 \rangle$).

향)으로 자장을 가한 경우에 나타나는 것으로 알려져 있다[8, 9]. 이러한 MgO(110)위에 형성한 기판 CoFe/Cu나 NiFe/Cu의 경우 (110) 우선방위를 보이며 일축이방성을 보인다[8, 9].

Fig. 3에는 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서 일축이방성을 보이는 재료의 TEM 사진을 나타내었다. TEM 사진에서 회절도형을 보면 (110) 우선방위를 보이는 것을 알 수 있으며 이것으로 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 50 Å의 구리 다층층을 증착하고 형성한 $[Cu(20 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10}$ 금속다층막의 면내일축이방성은 (110) 우선방위에 기인하는 것으로 생각된다.

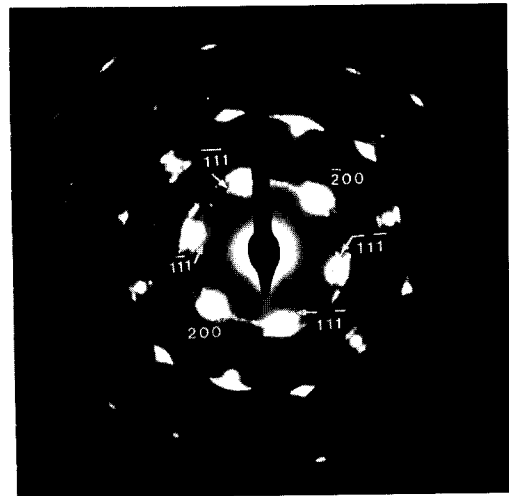


Fig. 3. TEM diffraction patterns of the sample which show uniaxial anisotropy.

Fig. 4에는 일축이방성을 보이는 $[Cu(x \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10}$ 시편의 Cu 사잇층 두께에 따른 자기저항 값의 변화와 자기저항 곡선의 변화를 나타내었다. 이때 사잇층 구리의 두께는 19 Å에서 24 Å으로 변화시켰다. Fig. 4에서 자기저항 곡선은 자화용이축으로 측정되었으며 모든 시편의 경우 일축 이방성을 나타내었다. 이때 사잇층 Cu의 두께는 일반적으로 금속 다층막에서 나타나는 사잇층 두께에 따른 자기저항 진동곡선에서 두 번째 최대값을 나타내는 부분으로 사잇층 Cu에 따라서 자기저항 값이 사잇층 Cu의 두께가 20 Å 근처에서 최대값을 보이다 다시 감소하였으며 반강자성적 결합력의 크기도 같은 형태로 변화였다. 사잇층 Cu에 따라서 이방성에너지(K_u)는 큰 차이가 없었으며 $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ erg/cc 정도의 크기를 보였다. 이때 이방성에너지

지의 크기는 $K_u = M_s (H_{sh} - 2H_{se}) / 2$ [9] (M_s : 포화자화, H_{sh} : 자화근란축으로의 포화자장, H_{se} : 자화용이축으로의 포화자장)을 이용하여 계산하였다.

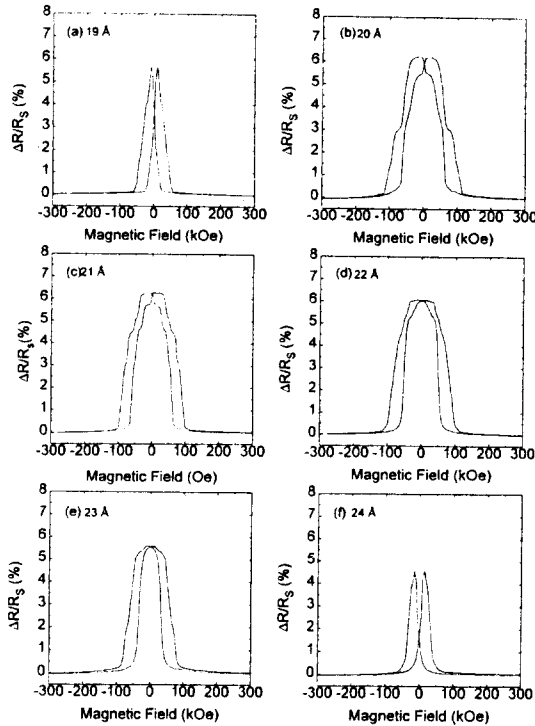


Fig. 4. R-H curves of $[Cu(x \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10} | Cu(50 \text{ \AA})$ on 4° tilt-cut Si(111) according to the thickness of Cu spacer : (a) 19 Å, (b) 20 Å, (c) 21 Å, (d) 22 Å, (e) 23 Å and (f) 24 Å

Fig. 5는 자성층과 사이트층의 적층수를 10층에서 20층으로 변화한 경우의 인가 자장의 방향에 따른 자기저항 곡선이다. 적층수가 증가함에 따라서 step은 사라지지만 면내 일축 이방성은 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 6에는 Cu바닥층을 사용한 경우 Si(100), Si(111), 유리 기판 위에서 $[Cu(20 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{20}$ 시편의 자기저항 곡선이다. 이러한 기판 위에서는 면내 자기 이방성을 관찰할 수 없었으며 XRD 측정 결과 특정한 우선방위를 관찰할 수 없었다.

일축 이방성에 미치는 바닥층의 영향을 관찰하기 위해서 바닥층을 사용하지 않은 경우와 Cu와 격자상수가 비슷한 NiFe, Ni를 바닥층으로 사용한 경우의 $[Cu(20 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{10}$ 금속다층막의

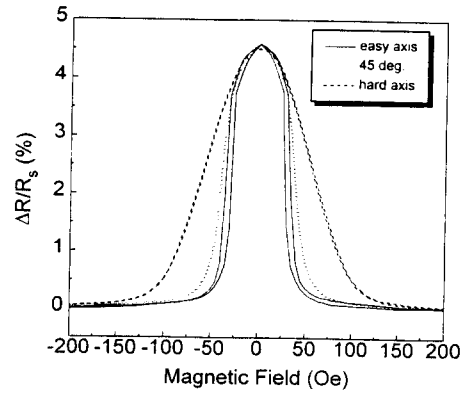


Fig. 5. R-H curves of $[Cu(20 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{20} | Cu(50 \text{ \AA})$ on 4° tilt-cut Si(111) with respect to the applied magnetic field. Number of stacked modules was changed from 10 to 20.

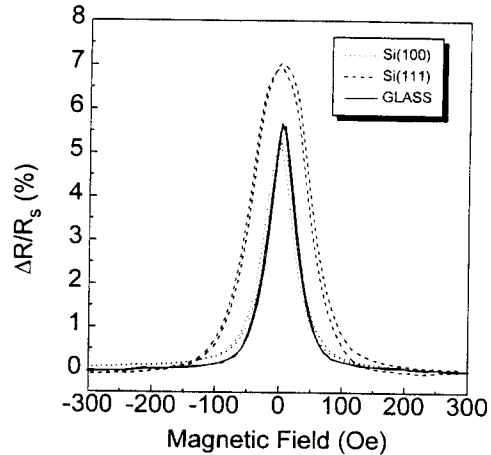


Fig. 6. R-H curves of $[Cu(20 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})/Ni(6 \text{ \AA})/NiFe(7 \text{ \AA})]_{20} | Cu(50 \text{ \AA})$ on Si(100), Si(111) and slide glass.

자기저항 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 이때의 기판은 모두 4° tilt-cut Si(111)을 사용하였다. NiFe나 Ni를 바닥층으로 형성한 경우 자기저항 값은 바닥층이 없는 경우보다 증가하였으나 자기저항곡선의 모양은 바닥층이 없는 경우와 비슷하였다. 세 경우 모두 면내에서 자기이방성을 보이지 않았으며 적층수가 10층이라도 자기저항곡선상에서의 step은 관찰되지 않았다. 이러한 이방성을 보이지 않는 시편을 X선 회절실험을 하면 특정한 우선방위를 찾을 수 없었다. 바닥층으로 사용된 NiFe, Ni가 Cu와 격자상수는 비슷하지만 4° tilt-cut Si

(111)기판 위에서 (110)으로 성장한 Cu와는 다르게 특정한 우선방위를 갖지 않고 성장하여 이방성을 보이지 않는 것으로 생각된다. Cu를 바닥층으로 사용하는 경우의 자기 이방성의 원인을 4° tilt-cut Si(111)기판 위에서 증착 초기의 Cu의 (110) 방향으로의 성장에 기인한다고 생각하여 Cu 바닥층을 증착하기 전 NiFe를 10 Å 증착하여 Cu 바닥층과 4° tilt-cut Si(111) 기판의 직접적인 접촉을 억제할 경우 Fig. 8과 같이 이방성이 사라짐을 발견할 수 있었다.

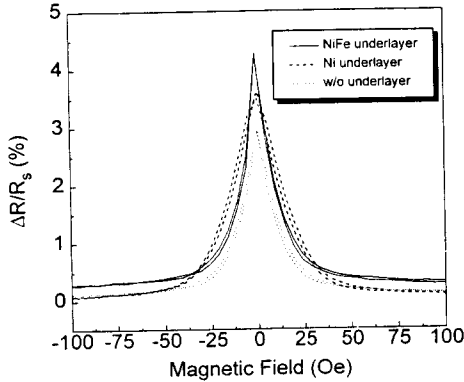


Fig. 7. R-H curves of [Cu(20 Å)/NiFe(7 Å)/Ni(6 Å)/NiFe(7 Å)]₁₀ | underlayer(50 Å) on 4° tilt-cut Si(111) with NiFe and Ni underlayers or without underlayer.

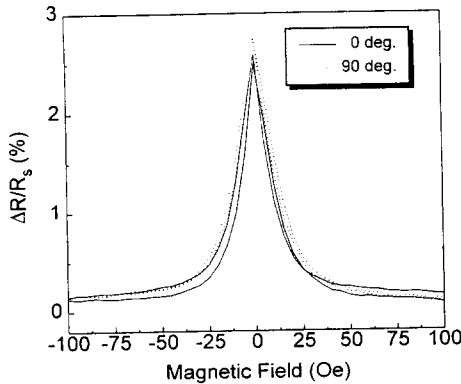


Fig. 8. R-H curves of [Cu(20 Å)/NiFe(7 Å)/Ni(6 Å)/NiFe(7 Å)]₁₀ | Cu(40 Å)/NiFe(10 Å) on 4° tilt-cut Si(111) with respect to the applied magnetic field.

IV. 결 론

1. 4° tilt-cut Si(111)된 Si(111) 기판 위에 Cu 바닥층을

증착하고 [Cu(20 Å)/NiFe(7 Å)/Ni(6 Å)/NiFe(7 Å)]_n 금속다층막을 형성한 경우 (110) 우선방위와 면내 일축자기이방성을 나타냈다.

2. Si(100), Si(111), slide glass 등의 기판을 사용하여 50 Å의 Cu 바닥층을 증착한 후 형성된 [Cu(20 Å)/NiFe(7 Å)/Ni(6 Å)/NiFe(7 Å)]₂₀ 금속다층막은 면내 자기이방성을 보이지 않았다.
3. 바닥층이 없는 경우나 NiFe, Ni 등의 바닥층을 사용한 경우 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서 [Cu(20 Å)/NiFe(7 Å)/Ni(6 Å)/NiFe(7 Å)]₁₀ 금속다층막은 면내 일축이방성을 보이지 않았으며, Cu 바닥층 증착 전 NiFe를 10 Å 증착한 경우도 면내에서 자기이방성을 보이지 않았다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 우수연구센터인 서울대학교 신소재 박막 가공 및 결정성장 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] B. D. Cullity, *Introduction to magnetic materials*, Addison Wesley, 207(1972).
- [2] R. P. Hunt, *IEEE Trans. Magn.*, **vol 7**, no. 1, 150(1971).
- [3] J. M. Daughton and Y. J. Chen, *IEEE Trans. Magn.*, **vol 29**, no. 6, 2705(1993).
- [4] S. Hashimoto and Y. Ochiai, *J. Magn. Magn. Mater.*, **vol. 88**, 211(1990).
- [5] K. -I. Min and S. -K. Joo, *J. Appl. Phys.*, **vol. 75**, no. 9, 4362(1994).
- [6] M. Naoe, Y. Miyamoto and S. Nakagawa, *J. Appl. Phys.*, **vol. 75**, no. 10, 6525(1994).
- [7] R. Nakatani, T. Dei, H. Hoshya, K. Hoshino and Y. Sugita, *J. Magn. Magn. Mater.*, **vol. 126**, 492(1993).
- [8] K. Inomata and S. Hashimoto, *J. Appl. Phys.*, **vol. 74**, no. 6, 4096(1993).
- [9] K. Inomata and Y. Saito, *Appl. Phys. Lett.*, **vol. 61**, no. 6., 726(1992).

Formation of GMR Metallic Multilayers with In-Plane Uniaxial Magnetic Anisotropy

Yong-Jin Song, Hyeong-Jun Kim, Byung-II Lee and Seung-Ki Joo

Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University

San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul, 151-742

(Received 28 June 1996, in final form 15 October 1996)

We have studied the magnetoresistance and the magnetic anisotropy of Cu/(NiFe/Ni/NiFe) metallic multilayers grown on Si(100), Si(111), 4° tilt-cut Si(111) or glass substrate. When the multilayer was grown on 4° tilt cut Si(111) with 50 Å of Cu underlayer, an in-plane uniaxial anisotropy was observed. On the other substrates such as Si(100), Si(111) or glass with Cu underlayer, however, no appreciable anisotropy was shown. The multilayer grown with NiFe or Ni underlayer or without underlayer did not show any anisotropy even on 4° tilt cut Si(111). When 10 Å of NiFe was deposited prior to the Cu underlayer, the anisotropy in Cu(NiFe/Ni/NiFe) multilayer disappeared.