

## Permalloy/Cu 다층막 자화반전의 미세 구조

염민수 · 장인우 · 변상진 · 이제형 · 박병기 · 이금원 \*

고려대학교 자연과학대학 응용물리학과  
충청남도 연기군 조치원읍 서창2리, 339-700

(2001년 2월 9일 받음, 2001년 8월 30일 최종 수정본 받음)

Glass/Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(2 nm)/[Cu(2 nm)Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(20 nm)]<sub>50</sub> 다층박막의 평면 홀 효과를 측정하였다. 평면 홀 효과에서 반복된 톱니모양의 홀 효과 신호가 관측되었다. 그 원인으로 갑작스러운 자력의 이동이 홀효과로 관측된 것이라는 가설을 세울 수 있다. 이러한 톱니모양의 평면 홀 효과는 모든 측정방향에서 관측되었다. 각 자성층의 전체 자화만이 자기저항을 결정하므로 자기저항의 특성곡선에서는 이러한 톱니모양에 해당하는 신호가 관측되지 않았다. 톱니모양의 근본 원인에 대한 연구는 더욱 수행되어야 할 것이다.

주제어 : 평면홀효과, 다층박막, 톱니모양

### I. 서 론

최근 들어 거대자기저항효과(GMR)의 발전과 더불어 이를 이용한 자기 센서의 개발에 관심이 커지고 있다. 2차 반강자성 결합을 갖는 Permalloy/Cu 다층막의 자기적 특성과 전도 특성을 연구하였다. 특성 조사에는 vibrating sample magnetometer(VSM), 자기저항, 평면 홀 효과(Planar Hall Effect)를 측정하였다. 측정 결과 자화반전에 있어서의 새로운 현상이 관찰되었다. 즉 반강자성 결합을 이루고 있는 자성층의 자화반전이 진행되는 동안 평면 홀 효과측정에서 미세한 피크가 반복되어 나타남을 발견하였다.

### II. 실험방법

시료는 Glass/Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(2 nm)/[Cu(2 nm)Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(2 nm)]<sub>50</sub> 다층박막을 사용하였다. Permalloy 층간의 간격은 2 nm (Cu층의 두께)이다. 이는 자성층인 permalloy 가 2차 반강자성 결합을 이루는 두께이다. Permalloy와 Cu의 평균 두께 측정은 X-ray fluorescence method(XRF)를 이용하였다[1].

측정을 위해 시료를 Fig. 1과 같은 구조로 시료를 에칭하고, 500 μA의 교류를 시료에 흘려주었다. Lock-in amplifier를 이용하여 4단자법으로 자기저항과 평면 홀 효과를 측정하였다. 전류의 흐름과 자화축방향과의 관계를

알아보기 위해 Fig. 1과 같은 모양을 자화용이축과 자화곤란축을 따라 2개 에칭하였다. 또한 각도 의존성을 보기 위해 스텝-모터를 이용하였으며, 실험장비와 데이터의 입력은 컴퓨터의 Data Acquisition(DAQ) board를 이용하였다. 걸어준 외부자기장은 ±100 Oe 이내이다. Fig. 2는 측정에 이용된 값들의 관계를 나타낸 것이다. ξ는 전류방향과 외부자기장 사이의 각도이다. 거대자기저항의 외부자기장과의 의존성은

$$GMR(H) = \frac{R(H) - R(H_{MAX})}{R(H_{MAX})} \times 100 (\%) \quad (1)$$

로 정의된다.

평면 홀 효과는 이방성자기저항효과에 의해 발생되는 것으로 전류방향에 수직인 전기장에 의한 전압차이를 측정하는 것이다. 이방성자기저항효과에 의해 발생되는 자기장의 이론적 벡터 표현은 식 (2)에 나타나 있다[2].

$$\vec{E} = \rho_{\perp} \vec{j} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})(\vec{j} \cdot \hat{\alpha}) \hat{\alpha} + \rho_H \alpha \times \vec{j} \quad (2)$$

여기서  $\vec{j}$ 는 전류밀도,  $\hat{\alpha}$ 는 자구의 자화 방향을 향하는 단위벡터이고,  $\rho_{\parallel}$ 와  $\rho_{\perp}$ 는 전류밀도  $\vec{j}$ 에 각각 평행, 수직인 비저항값이다. 위 식의 우변의 마지막 항인  $\rho_H \hat{\alpha} \times \vec{j}$ 이 자기저항효과에 의한 전기장이다. 외부 자기장이 시료에 가해졌을 때, 시료 안에 있는 자화는 자기장을 걸어준 방향으로 ξ만큼 회전하게 된다. 이 때  $\vec{E}$ ,  $\vec{j}$ 는 자화의 새로운 방향에 대해 수평 그리고 수직인 방향으로 분리할 수 있다. 따라서 위 식을 x와 y에 대한 성분으로 전개할 수 있다.

\* Tel: (041) 860-1326, E-mail: krhie@tiger.korea.ac.kr

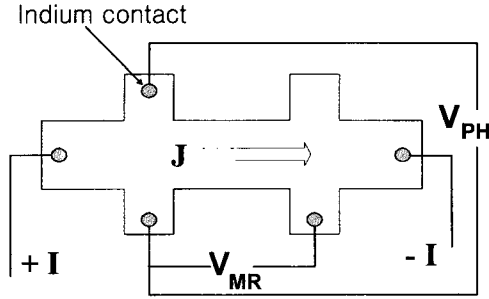


Fig. 1. Patterned sample to measure magnetoresistance and planar hall effect.

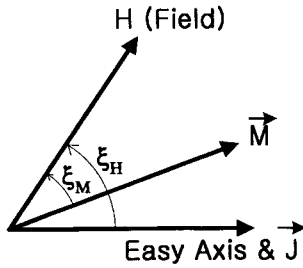


Fig. 2. Definition of angles used in text. M and H stands for magnetization and applied field. Direction of current is laid along easy axis direction.

$$E_x = [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \alpha_x \alpha_x] J_x$$

$$= [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin^2 \theta \cos^2 \xi] J_x \quad (3)$$

$$E_y = [(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \alpha_x \alpha_x + \rho_H^{perpendicular} \alpha_z^2] J_x \quad (4)$$

$$= \left[ \frac{1}{2} (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin^2 \theta \sin 2\xi + \rho_H^{perpendicular} \cos \theta \right] J_x$$

$$= \rho_H J_x \quad (4)$$

$\rho_H = \frac{1}{2} (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \sin^2 \theta \sin 2\xi$  이 평면 홀 효과가 되는 것이다. 평면 홀 효과는  $\sin 2\xi$ 에 의존하므로  $\xi = \pm 45^\circ$ 에서 최대 값을 갖게 된다.

### III. 실험결과

Fig. 3은 VSM을 이용해 자화의 변화를 측정한 것이다. Fig. 3(a)에서 보이는 것은 특이한 현상으로써 이러한 모양이 측정된 원인은 반강자성 결합내의 강자성 결합 때문이다. Permalloy와 Cu가 증착되는 과정에서 Ni 원자내에서의 Cu 원자의 확산정도가 Cu 원자내에서 Ni의 확산정도보다 10배정도 크기 때문에, 반강자성 결합을 이루는 자성층간의 거리가 줄어들어 강자성 결합을 이루게 된다[3,

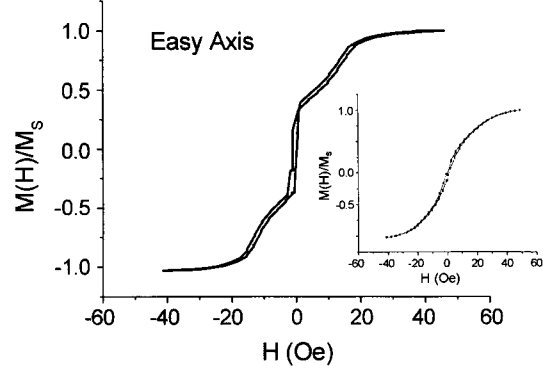


Fig. 3. VSM diagram-easy Axis. The inset shows hard axis.

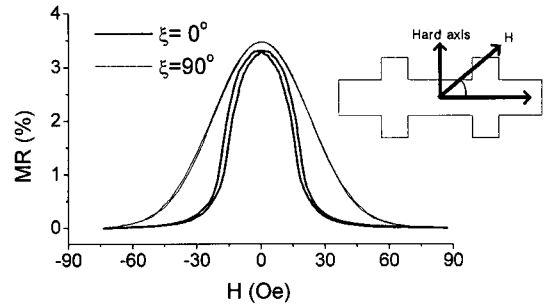


Fig. 4. Magnetoresistance of a sample with easy axis parallel to the current.

4]. 이것을 강자성 핀홀(Ferromagnetic pinholes)이라 한다. Cu층이 1.72 nm일 때 Permalloy 층간의 결합은 강자성 결합이 되고, Cu층이 2.1 nm일 때는 Permalloy 층간의 결합이 반강자성 결합이 된다. Ni가 파고드는 깊이는 약 0.2 nm가 된다[5]. 이러한 영향 때문에 자화용이축 방향의 VSM에서  $\pm 20$  Oe내에서 불룩한 모양의 자화이력기 생기게 되는 것이다. Cu의 두께가 2 nm일 때 시료의 반강자성 결합정도는 약 80%이다[1, 6, 7].

Fig. 4는 자기저항을 측정한 데이터이다. 전류의 방향과 외부자기장의 방향이 자화용이축 방향과 평행한 상태에서 J에 평행한 경우( $\xi = 0^\circ$ )의 자기저항비가 수직인 경우( $\xi = 90^\circ$ )의 자기저항비보다 작다. 자기저항비는  $\xi = 0^\circ$ 일 때 3.32%,  $\xi = 90^\circ$ 일 때 3.47%가 나왔다. 1차 반강자성 결합에서의 최대 자기저항비가 약 6~7%가 나오는 것에 비하면 변화가 작지만, 민감도는 1차 반강자성 결합인 경우보다 4배 이상 좋아졌다[1]. Fig. 5는 전류의 방향이 자화 근관축 방향과 평행한 경우로 자기저항비는 Fig. 4의 경우보다 작게 나왔지만,  $\xi = 90^\circ$ 인 경우에는 자기저항비가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 자기저항비는 작지만 민감도는

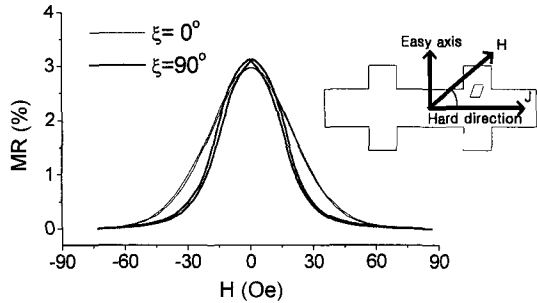


Fig. 5. Magnetoresistance of a sample with hard axis parallel to the current.

종아짐을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5를 비교해보면  $\xi = 90^\circ$ 일 때 자기저항 값이 크다는 것을 알 수 있다. 이는  $\xi = 90^\circ$ 일 때  $H = 0$  때와  $H = H_{SAT}$  때의 자화의 방향이 전류의 방향에 비해 변화하면서  $\rho$  값이 변화하는 것이다. 다시 말해서  $\xi = 0^\circ$ 일 때는 자기장의 변화에 대해 자화가 J와 서로 평행하지만,  $\xi = 90^\circ$ 일 때에는  $H = H_{SAT}$ 에서는 자화와 J의 방향이 수직이다가  $H = 0$ 으로 갈 때에는 자화와 J가 서로 평행해지면서  $\rho$ 가 변화한다. 이러한 변화로 인해 Fig. 4에서는  $\xi = 90^\circ$ 일 때 자기저항의 변화가 더 커지는 것이다. Fig. 5에서는  $\xi = 0^\circ$ 일 때 자화와 J의 방향이 변화하므로 이때의 자기저항의 변화가 더 큰 것이다.

Fig. 6은 자화용이축과 외부자기장의 방향이 평행한 경

우( $\xi = 0^\circ$ )의 평면 홀 효과를 측정된 것이다. 식 (4)에서 보이는 것과 같이  $\sin 2\xi$ 에 의존함을 나타내고 있다.  $\xi = 45^\circ$ 에서 최대값이 나오고 있으며,  $\xi = 135^\circ$ 에서 최소값이 나왔다.  $\sin 2\xi$ 에 의존하므로  $0^\circ$ 와  $180^\circ$ 의 값은 같다. 이것은 Fig. 7의 자화용이축 방향으로 전류를 흘려주었을 때에도 같은 현상이 나타난다. Fig. 6에서 주목할 만한 현상은 자기장이 전류의 방향과 평행할 때  $H = 0$ e 부근에서 자화의 변화가 크다는 것이다.  $\xi$ 가 증가함에 따라 이 현상은 조금씩 없어짐을 알 수 있다. 또한 평면 홀 효과가 변화하는 지점이 자기저항이 증가하기 시작하는 지점에서 일어남을 알 수 있다.

평면 홀 효과는 자기저항에서 보이지 않는 스핀의 회전을 반영하기 때문에 좀 더 자세한 스핀의 운동을 알 수 있다. 주로 반강자성 결합을 하고 있기 때문에 외부자기장이 줄어들게 되면 한 쪽 방향으로 정렬한 자화들이 원래의 반강자성 결합으로 돌아가기 때문에 홀비저항이 커짐을 알 수 있다. 자기장이 자화용이축으로 걸렸을 때에는 자화들이 급격히 변화하고(Fig. 6의  $\xi = 0^\circ$ 와 Fig. 7의  $\xi = 90^\circ$ ), 자기장이 자화근란축으로 걸렸을 때에는(Fig. 6의  $\xi = 90^\circ$ 와 Fig. 7의  $\xi = 0^\circ$ ) 자화들의 변화가 천천히 일어남을 알 수 있다. Fig. 8은 자화근란축 방향으로 전류를 걸어주고  $\xi = 90^\circ$ 인 경우의 평면 홀 효과를 측정된 그림을 확대한 것이다.  $\pm 15$  Oe사이에서 급격한 자화의 변화가 보이고 있다. 이는 인가자기장의 변화에 따른 자구의

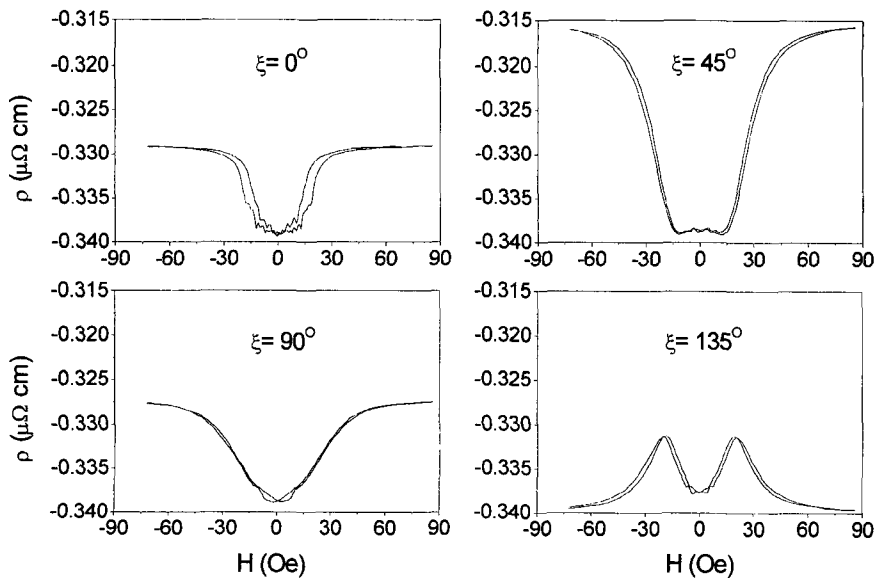


Fig. 6. Planar hall effect of current parallel to easy Axis.

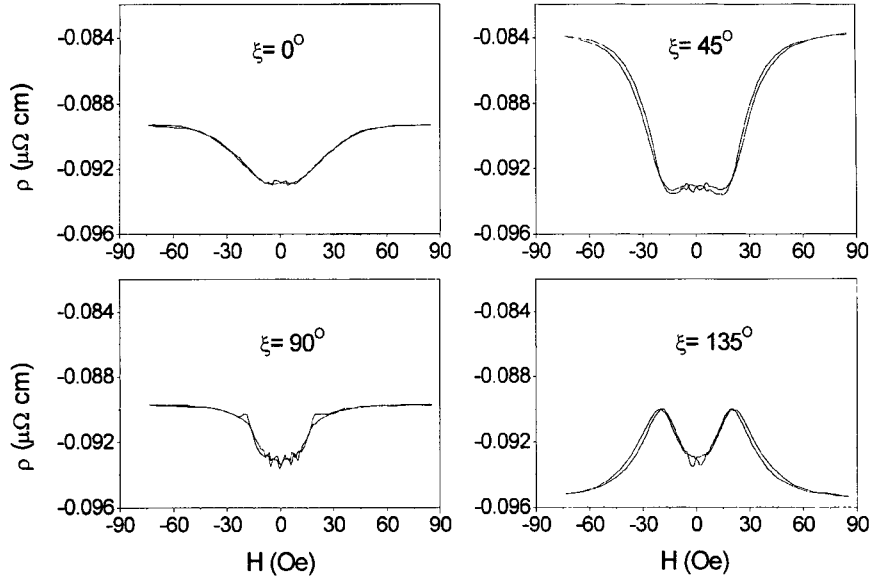


Fig. 7. Planar hall effect measured with various angles of applied field. The direction of current was set along hard axis in this case.

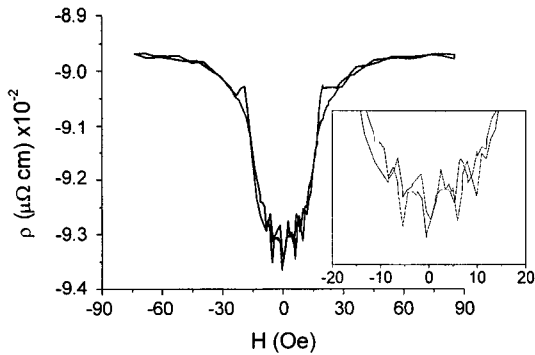


Fig. 8. Sawtooth like planar hall effect of current // hard Axis at  $\xi = 90^\circ$ .

변화에 따른 자구벽의 이동이 측정된 것으로 보인다. 자구벽이 이동하면서 홀 측정단자를 수직으로 지나가면서 홀 전압의 급격한 변화가 검출된 것이다. 그러나 좀 더 확실하고 근본적인 원인을 알기 위하여 더 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### IV. 결 론

- 1) 원자들간의 확산 정도의 차이로 인해 반강자성 결합 내에 예기치 않은 강자성 결합이 형성되었으며, 강자성 결합의 영향은 자화의 이동에 많은 영향을 준다.
- 2) 인가자기장과 전류 방향이 다르면 자기저항의 크기가 달라지는 것을 이방성자기저항로 설명하였다.

- 3) 평면 홀 효과의 측정으로 다층박막의 자화반전에 있어서의 새로운 특성을 관찰하였다.
- 4) 2차 반강자성 결합으로 형성된 다층막은 작은 자기저항비를 보이지만 1차 반강자성 결합보다 높은 민감도를 나타낸다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] F. Stobiecki, T. Lucinski, J. Dubowik, B. Szymanski, M. Urbaniak, M. Schmidt, *Electron Technology* **31**, 80 (1998).
- [2] T. R. McGuire and R.I. Potter, *IEEE Trans. Mag. Mag-* **11**, 1018(1975).
- [3] J. F. Bobo, M. Piecuch and E. Snoeck, *J. Magn. Magn. Mater.*, **126**, 440(1993).
- [4] H. Kikuchi, J. F. Bobo, and R. L. White, *IEEE Trans. Mag.*, **33**, 3583(1997).
- [5] F. Stobiecki, Private communication.
- [6] M. Urbaniak, T. Lucinski, F. Stobiecki, *J. Magn. Magn. Mater.*, **174**, 192(1997).
- [7] M. Urbaniak, T. Lucinski, F. Stobiecki, *J. Magn. Magn. Mater.*, **190**, 187(1998).

## Fine Structure in Magnetization Reversal of Permalloy/Cu Multilayer

M-S Youm, I-W Jang, S-J Byeun, J-H Lee, B-K Park and K. Rhie

*Department of Physics, College of Science and Technology, Korea University Chochiwon 339-700, South Korea*

(Received 9 February 2001, in final form 30 August 2001)

Magneto-resistance and Planar Hall effect of Glass/Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(20 Å)/[Cu(20 Å)Ni<sub>83</sub>Fe<sub>17</sub>(20 Å)]<sub>50</sub> multilayer were measured. Repeated saw tooth like planar Hall effect signal was observed in the range of magnetization reversal process, while no sign of such saw tooth was observed in Magneto-resistance diagram. For the reason of saw tooth like signal, it is supposed that subsequent abrupt domain wall motion of each magnetic layer in the process of magnetization reversal process was observed in planar Hall effect in transverse direction to the current direction. This fine structure of planar Hall effect was observed for applied fields in any direction. Magneto-resistance curve did not show this fine structure of magnetization reversal, of course, since only net magnetization of each layer has to do with the resistivity. Extended research on the reason of this sawtooth like signal should be conducted.

**Key words :** planar hall effect, sawtooth like hall effect, AMR multilayers