

퍼멀로이 박막의 자화 용이축과 자기저항 변화와의 상관관계에 대한 연구

황태종 · 류영식 · 권진혁 · 김기현 · 김동호*

영남대학교 물리학과, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2008년 1월 10일 받음, 2008년 2월 1일 최종수정본 받음)

일축 이방성을 가진 퍼멀로이 박막을 제작하여 이방성 자기저항(anisotropic magnetoresistance)에 대하여 연구하였다. 시편의 길이 방향에 대하여 자화 용이축의 각을 18°씩 기울어지게 변화를 준 5종류의 시편에 대하여 자기저항의 변화를 조사하였다. 박막면에 평행한 인가 자기장에 대하여 시편의 길이 방향과 자화 용이축 사이의 각이 증가함에 따라 세로자기저항(longitudinal magnetoresistance)의 변화 폭은 증가하는 반면, 가로자기저항(transverse magnetoresistance)의 변화 폭은 감소를 나타내었다. 이러한 자화 용이축 변화에 따른 자기저항의 변화를 이방성 자기저항과 일축 이방성을 가진 단일자구 모델로 설명하였다. Magneto-optic Kerr effect를 이용하여 측정된 자구 사진으로부터 자화 스위칭이 일어나는 구간에서 반대 방향의 자구가 생성되고 전파되는 과정을 관측하였으며 이에 대응하는 자기저항의 변화를 관측하였다.

주제어 : 이방성 자기저항, 자화 용이축, 자구벽, Kerr 효과

I. 서 론

강자성체 중 잘 알려진 퍼멀로이는 일축 이방성을 가지며 이러한 결정자기 이방성으로 인해 약 5% 정도의 자기저항 이방성을 나타낸다[1]. 이러한 특성 때문에 거대자기저항을 이용한 소자가 개발되기 전까지 자기센서로 많이 사용되었다. 이방성 자기저항은 결정 자기이방성에 의해서 강자성체의 자기저항으로 나타나며, 강자성체의 자기이방성 중에서 결정자기 이방성(magnetocrystalline anisotropy)은 내적인 특성이다. 특히, 인가자기장이 박막면에 평행하고 박막 두께가 충분히 얇아 Néel 자구벽이 형성될 때는 이방성 자기저항이 강자성체의 자기저항의 변화에 주된 요인인 역할을 한다. 이러한 이방성 자기저항의 특징은 전류밀도와 자화벡터의 사이각 변화에 의존성을 따른다.

본 연구에서 자화 용이축과 전류의 방향이 특정한 각을 이루도록 시편을 제작하여 이방성 자기저항에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 단일자구모형[2]으로 해석하였다. Néel 자구벽의 생성이 자기저항에 미치는 영향을 연구하기 위하여 실시간으로 자구 사진을 촬영하고, 동시에 자기저항의 변화를 측정하여서 자기저항과 자구의 변화 간의 관계를 알아보았다.

II. 실험

DC magnetron sputtering 시스템을 이용하여 퍼멀로이 박막을 제작하였다. Fe_{0.2}Ni_{0.8} 조성의 타겟을 사용하였고 박막이 Néel 자구벽을 가지도록 300 Å 정도 두께로 증착하였다. 기

판은 3000 Å 두께로 SiO₂가 열 산화법으로 올려진 10 mm×10 mm 크기의 Si를 사용하였으며, 박막 증착시 시스템의 초기 진공은 3×10⁻⁷ Torr 이하로 유지하였다. 자화 용이축과 자기저항의 상관관계를 조사하기 위해 시편의 길이 방향에 대하여 자화 용이축이 각각 0°(T0), 18°(T18), 36°(T36), 54°(T54), 72°(T72)로 기울어지게 변화를 준 5종류의 스트립 형태의 시편으로 제작하였다. 각 스트립의 크기는 0.2 mm×1.4 mm이다. 이때, 시편의 길이와 폭이 박막의 두께에 비하여 매우 크므로 탈자장에 의한 효과는 거의 무시될 수 있다 [3]. 자기장은 기판 면에 평행하게 인가하였고 시편의 길이 방향에 대하여 0°, 30°, 60°, 90°인 각의 변화를 주면서 자기저항을 측정하였다. 그리고 전류방향은 항상 스트립의 길이 방향으로 인가하였고, 인덱 도트를 이용한 사 단자 방법으로 측정하였다. 시편의 자화특성 곡선은 Kerr 효과를 이용하여 측정하였으며, 시편의 길이 방향에 대하여 자화 용이축이 30°(T30)인 시편을 별도로 제작하여 magneto-optic magnetic microscope(MOMM)를 이용한 자구 사진과 자기저항을 동시에 측정하였다. T30 시편은 300 Å 두께의 퍼멀로이 단일층을 100 μm×800 μm인 스트립 형태로 식각한 후 자기저항 측정용 Au 단자의 간격이 100 μm되게 리프트 오프 작업을 거쳐 제작되었다. 그리고 모든 시편에는 퍼멀로이 박막의 산화를 막기 위하여 5 nm 정도의 Nb 층을 보호층으로 증착하였다.

III. 결과 및 토의

Fig. 1(a), (b)는 자화 용이축에 대해 스트립 길이 방향(전류방향)의 기울어진 각도가 0°, 36°, 72°인 시편의 세로자기저항과 가로자기저항 곡선이다. 포화상태일 때의 자기저항의 값

*Tel: (053) 810-2340, E-mail: dhkim@ynu.ac.kr

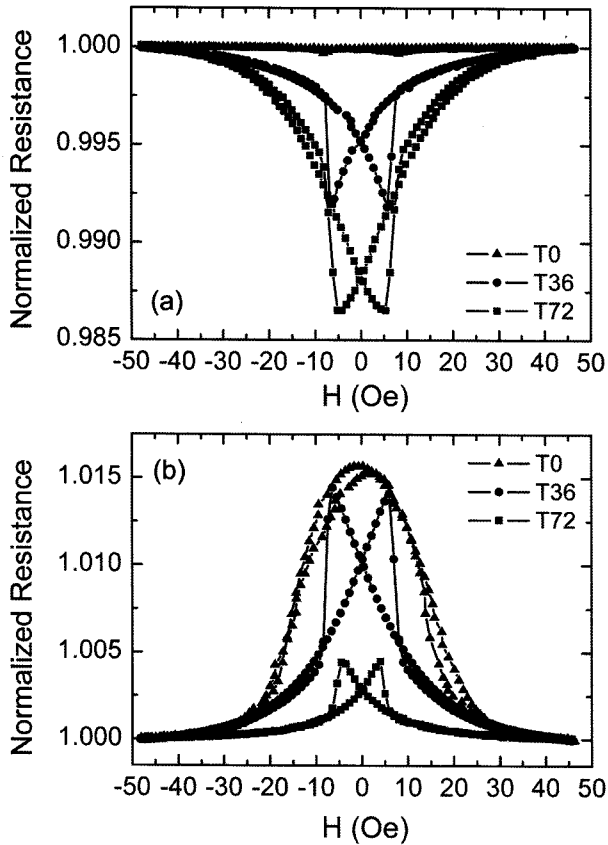


Fig. 1. Normalized magnetoresistance curves for (a) $H \parallel I$, (b) $H \perp I$ for strips with variously tilted easy axis from the current direction. Plotted curves are for (\blacktriangle) 0° , (\bullet) 36° , (\blacksquare) 72° , respectively.

을 “1”로 두고 정규화 하였다. 단, Nb에 의한 shunt 효과로 인하여 Fig. 1에 나타난 저항 변화는 실제 퍼멀로이 박막의 저항 변화보다 작은 값이 된다. 그러나 자화 용이축과 시편의 사이각 변화에 따른 현상에 대한 정성적 해석에는 영향을 미치지 않는다. 자기장 증가에 따라 세로자기저항은 증가하고, 자화 용이축과 시편의 길이 방향의 사이 각이 증가에 비례하여 자기저항의 변화 폭이 증가함을 볼 수 있다. 반면에 가로 자기저항은 자기장 증가에 따라 감소를 보이고, 사이각이 줄어들수록 자기저항의 변화 폭이 증가한다. 이런 현상은 전류밀도와 자화벡터 사이의 각이 θ 일 때 $\cos^2\theta$ 에 비례하여 변화하는 이방성 자기저항으로 잘 설명된다. 즉, 전류밀도와 자화벡터의 사이각이 작을수록 이방성 자기저항은 증가한다. 만약, 자화 용이축과 자기장, 자화벡터가 모두 같은 방향이면 자화 스위칭이 일어나더라도 $\cos^2\theta = 1$ 로 항상 일정하다. 따라서 이 경우에는 자기장 방향이 변하더라도 자기저항은 거의 변하지 않는다. Fig. 1(a)에서 시편의 각이 0° 인 T0의 세로자기저항 곡선은 자화 용이축과 시편의 길이 방향이 잘 일치함을 보여준다. 반면에 자기장이 전류와 자화 용이축 방향에 수직인 경우의 자화 반전은 자화의 회전에만 의하여 발생

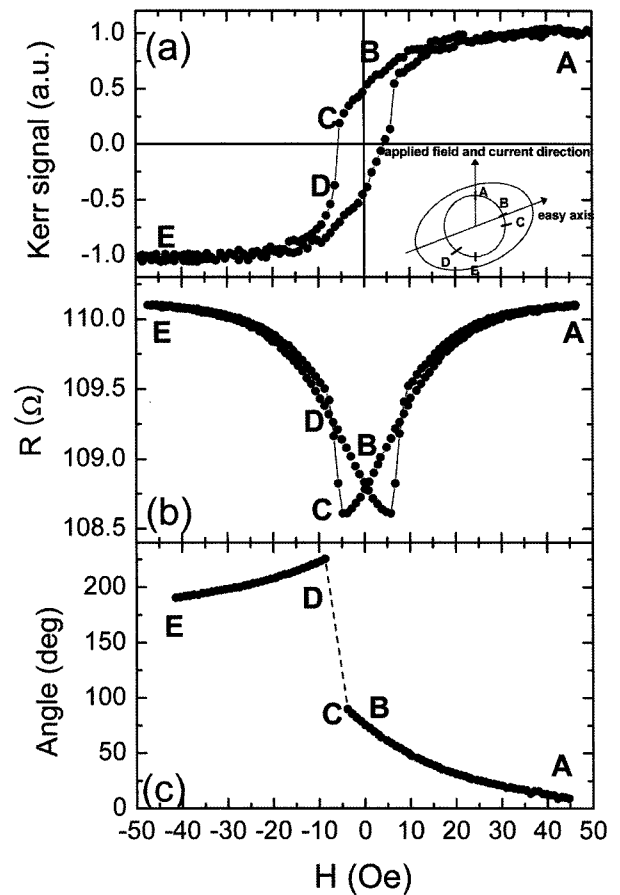


Fig. 2. (a) Hysteresis loop measured by using magneto-optic Kerr effect, (b) the longitudinal magnetoresistance and (c) angular position of magnetic moment for T72 sample.

함으로 T0 시편의 가로 자기저항은 Fig. 1(b)처럼 비등방성 자기저항의 특성인 $\cos^2\theta$ 의존성을 나타내게 된다.

사이 각이 72° 이고 전류방향과 자기장의 방향이 일치하는 시편(T72)에서 Kerr 효과로 측정된 자기력 곡선과 자기저항의 상관관계를 Fig. 2에 나타내었다. 자기력 곡선과 자기저항의 변화는 일축 이방성의 단일자구 모형으로 잘 설명된다. Fig. 2(a)에서 자기장이 포화자기장까지 증가한 A에서 시작하여 자기장을 서서히 줄여가면 0 Oe에서 잔류 자화가 되는 B 지점을 통과한 후 음의 보자력 근방인 C에 접근하게 된다. 이때 C 지점에서 자화는 갑자기 새로운 방향 D로 약 180° 로 스위칭한다. 그리고 좀더 자기장을 가하면 E 지점에 도달하여 자화는 반대 방향으로 포화된다. 삽입된 그림은 자기장과 자화 용이축에 대한 자화방향을 모식적으로 나타낸 것이다. Fig. 2(b)에서 자기저항은 포화 자기장인 A에서 B로 접근하면 전류방향과 자화벡터의 사이각이 증가하게 되므로 자기저항은 감소하게 되고 C 지점까지 이러한 경향은 이어진다. C에서 D로 스위칭 한 후에는 전류와 자화벡터의 사이 각이 좁아지게 되므로 자기저항의 증가를 초래하며 포

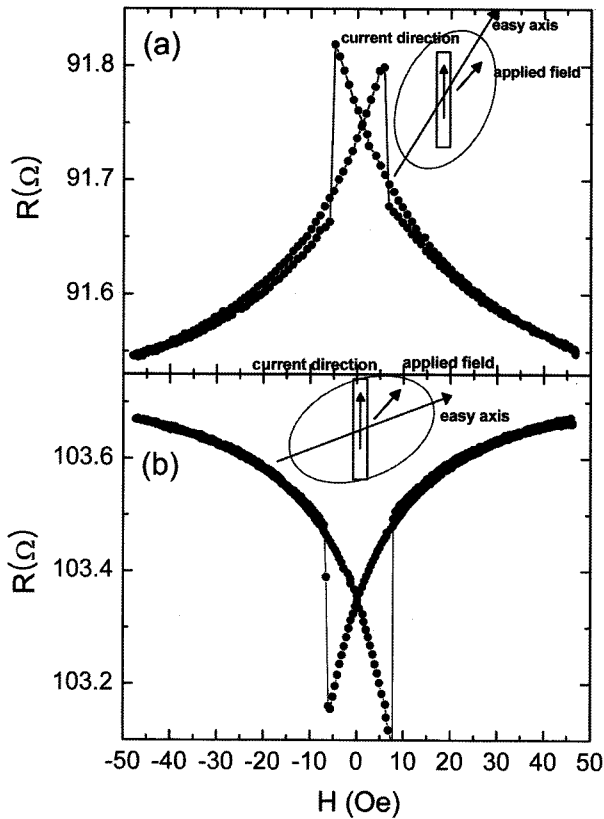


Fig. 3. Magnetoresistance curves for samples with its easy axis tilted from the current direction by (a) 18°, (b) 54°, while constantly keeping the angle between applied field and current.

화자장 E까지 이어진다. 비등방성 자기저항 모형을 적용하여 계산한 각 지점의 각도 값을 Fig. 2(c)에 나타내었다. 여기서 자화가 A 방향일 때를 0°로 하였고 시계방향으로 각도가 증가한다. 따라서 Fig. 2(b)에서 세로자기저항의 B, C, D, E 지점은 각각 72°, 89°, 225°, 180°가 된다.

Fig. 3은 전류방향과 자기장의 사이 각이 30°로 동일하나 자화 용이축이 각각 18°, 54°인 시편의 자기저항 곡선이다. Fig. 3(a)에서 18°인 시편(T18)의 경우 자화 용이축이 인가 자기장과 전류방향 사이에 있다. 자기장 감소에 따라 자화방향이 용이축으로 접근하면서 반시계 방향으로 회전하게 되고, 이에 따라 전류방향과의 사이각이 좁아지게 되므로 저항은 증가로 나타난다. 한편, Fig. 3(b)에서 54°인 시편(T54)의 경우 인가 자기장의 방향이 자화 용이축과 전류방향 사이에 있어 자기장 감소에 따라 자화방향이 시계 방향으로 회전하여 용이축에 접근하므로 전류와 자화의 각도가 증가하게 되어 자기저항의 감소로 나타난다.

앞에서 보여준 그림들에서 세로자기저항인 경우 보자력 부근의 자기장에서 급격한 증가를 보였으며, 가로자기저항인 경우에는 급격한 감소를 나타나는 것을 볼 수 있었다[4, 5]. 자

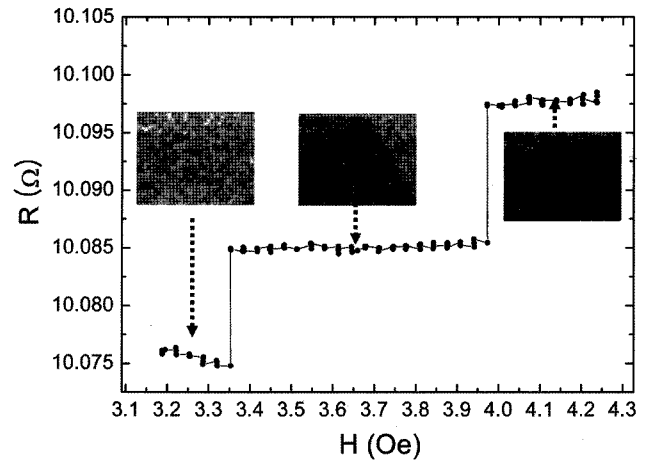


Fig. 4. Simultaneously taken domain reversal patterns and the MR for a sample with its axis tilted 30° from the current direction. The resistance jumps were associated with the nucleation of the opposite magnets domain and its propagation.

화가 스위칭하는 과정에서 발생하는 현상을 이해하기 위하여 MOMM을 이용하여 자구 사진을 자기저항과 동시에 측정하였다.

Fig. 4는 전류 방향에 대해 자화 용이축이 30° 기울어진 시편의 자기저항과 자구 사진이다. 자기장은 사진의 수직방향으로 인가하였으며, 자구 사진의 크기는 80 μm×64 μm 이다. 측정을 위해서 먼저 시편의 자화를 음으로 포화를 시킨 후, 양의 보자력 직전의 자기장까지 자기장을 변화시킨 다음 보자력 구간을 천천히 지나가면서 자구 사진과 세로자기저항을 동시에 측정하였다. 사용된 시편인 경우 3 Oe에서 천천히 자기장을 증가시켜서 4.2 Oe 정도까지 측정하였다. 자구 사진에서 밝고 어두운 명암 차는 자기모멘트의 방향이 거의 반대 방향을 의미한다. 자구 사진에서 자구벽은 자화 용이축의 방향을 향했다. 자화 스위칭 전과 후의 자화방향과 전류의 사이각이 서로 다르기 때문에 밝은 영역과 어두운 영역의 자기저항이 서로 다르게 되어 어두운 영역이 증가함에 따라 자기저항도 증가하는 단계를 거친다. 이로부터 자화 스위칭 과정은 반대방향의 자구가 생성되고 전파되는 과정임을 확인할 수 있다. 그리고 자구의 전파는 연속적이 아니라 불연속적으로 일어남을 알 수 있다.

IV. 결 론

퍼멀로이 박막의 자기저항과 Kerr 효과를 이용하여 자기력 곡선과 자구 사진을 측정하였다. 자화 용이축의 변화에 대한 자기저항의 변화를 일축성 단자구 모형과 이방성 자기저항으로 설명하였다. 보자력 부근에서 발생하는 급격한 자기저항의 변화는 반대 방향 자구가 생성되고 전파되는 과정으로

확인되었다. 이러한 자구 사진과 자기저항의 동시 측정을 이용하여 스위칭 과정을 직접적으로 관측할 수 있었다.

감사의 글

자구 사진 측정은 한국과학기술원 나노스핀물성센터의 도움으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] T. R. McGuire and R. I. Potter, IEEE Trans. Magn., **MAG-11**,

618 (1973).

[2] M. Soinski, IEEE Trans. Instrument & Measurement, **39**, 704 (1990).

[3] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, Phil. Trans. Roy. Soc. London A, **240**, 599 (1948).

[4] S. K. Decker and C. Tsang, IEEE Trans. on Magnetics, **16**, 643 (1980).

[5] J. Meier, B. Doudin, and J.-Ph. Ansermet, J. Appl. Phys., **79**, 6010 (1996).

Relation Between Magnetization Easy Axis and Anisotropic Magnetoresistance in Permalloy Films

Tae Jong Hwang, Yeung-Shik Ryu, Jin-Hyuk Kwon, Ki Hyeon Kim, and Dong Ho Kim*

Department of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received 10 January 2008, in final form 1 February 2008)

We studied the effect of easy magnetization axis orientation with respect to the strip direction by measuring the magnetoresistance (MR), the magneto-optic Kerr effect (MOKE), and real-time domain evolution. The five strips were patterned on a single chip with the easy axis orientation of each strip relative to the longitudinal direction by around 0° , 18° , 36° , 54° and 72° , respectively. The overall shape of field dependent MR was mostly governed by the anisotropy magnetoresistance. The relative change of the longitudinal MR was significantly increased with increasing angle between the easy axis and strip direction, whereas, the transverse MR variation rate was decreased with increasing angle. Several MR steps were observed during the magnetization reversal, and the simultaneous measurement of the MOKE and the domain images identified that the MR steps were associated with evolution of the oppositely directed magnetic domain.

Keywords : anisotropic magnetoresistance, magnetization easy axis, magnetic domain wall, Kerr effect