

## 2차원 자화벡터를 이용한 퍼멀로이 박막의 이방성자기저항 해석

이영우 · 호영강 · 임재준 · 김철기 · 김종오\*

충남대학교 신소재공학부  
대전광역시 유성구 궁동 220

윤대식

고기능성 자성재료 연구센터  
대전광역시 유성구 궁동 220 충남대학교

(2004년 6월 26일 받음, 2004년 8월 27일 최종수정본 받음)

2 쌍의 pick-up 코일을 이용하여 퍼멀로이 박막의 면내 2차원 자화벡터를 측정하고 이방성자기저항을 조사하였다. 면내의 x, y 축 방향의 모멘트를 동시에 측정함으로써 자화벡터를 정확하게 결정하였다. 퍼멀로이 박막의 이방성자기저항은 일축이방성이 증가할수록 전류와 자화벡터의 사잇각의 함수로 표현되는 관계식에 근접한 거동을 나타냈다. 자기저항비 변화는 전류방향에 평행한 y 모멘트 성분의 변화와 잘 부합하였으며 y 모멘트의 크기에 비례함을 알 수 있었다.

**주제어** : 이방성자기저항, 벡터 pick-up 코일, 퍼멀로이, 일축이방성

### I. 서 론

도체에 자기장이 인가되면 도체 내부를 이동중인 전자는 로렌츠 힘을 받게 된다. 로렌츠 힘은 전자의 이동경로에 영향을 주기 때문에 결국 도체의 저항은 자기장에 의해서 변화하게 된다. 강자성을 띠는 도체에서는 자기모멘트들이 같은 방향으로 정렬하고자 하는 성질이 있기 때문에 비강자성체와 비교할 때 매우 강한 자기장을 받는 상태가 된다. 한쪽으로 정렬된 자기모멘트는 단위부피당 자기모멘트인 자화벡터로 표시된다.

강자성체의 자화벡터는 재료의 결정학적 방향에 따라 이방성을 갖기 때문에 강자성체의 자기저항은 이방성자기저항이라고 불린다. 강자성 박막의 이방성자기저항은 전류밀도와 자화벡터의 사잇각에 의해서 결정된다. 강자성체 박막의 이방성 자기저항은 미소자기장에 대한 감도가 우수해서 자기센서 분야에 널리 이용되고 있다. 최근에는 위치기반시스템의 GPS(Global Positioning System) 소자의 핵심센서로 연구되고 있다[1-4].

박막은 2차원 구조이므로 면내에 x, y 방향과 면에 수직인 z 방향의 좌표계를 설정하면 z 방향은 두께 방향이 된다. 일반적으로 자성박막의 자화벡터는 형상자기이방성 때문에 큰 수직자기이방성이 없는 한 면내에 존재한다. 따라서 자성박막의 자화벡터는 외부 자기장에 따른 면내의 2차원 자기모멘트 거동을 조사해야 한다. 일반적으로 외부 자기장에 따른 자화

상태를 측정하기 위해서 자기이력곡선을 측정하지만 기존의 자기이력곡선은 자기장 방향의 모멘트 성분만을 측정한 결과이다.

본 연구에서는 기존의 진동시료형자력계에 자기장 방향을 x, 자기장에 수직인 방향을 y로 하면 x 모멘트( $m_x$ ), y 모멘트( $m_y$ )를 동시에 측정할 수 있는 벡터 pick-up 코일을 설치하여 모멘트를 x, y 성분으로 나누어서 측정하고 박막 면내의 자화벡터 거동과 이방성자기저항의 상관관계를 조사하였다.

### II. 실험방법

RF 마그네트론 스퍼터링법으로 지름 12 mm, 두께 100 nm의 퍼멀로이 원형박막을 제작하였다. 성장실의 기본진공은  $5 \times 10^{-7}$  Torr였으며 Ar 가스 압력은  $3 \times 10^{-3}$  Torr였다. 박막의 자화거동을 측정하기 위하여 벡터 pick-up 코일을 이용하여 x, y 방향의 자기이력곡선을 측정하였고 정전류를 인가하고 전압변화를 읽어서 저항을 측정하는 4 단자법을 이용하여 자기저항을 측정하였다. Fig. 1에 측정에 이용된 좌표계 및 배치를 도시하였다.

퍼멀로이 박막에 일축이방성을 유도 및 증가시키기 위해서 다음과 같은 세 단계를 거쳤다. 우선 성막하는 동안 100 Oe의 자기장을 인가하여 일축이방성을 유도하였고, 2차로 진공 자기장열처리를 수행하였다. 열처리로의 기본 진공은  $5 \times 10^{-6}$  Torr였으며 150°C에서 한 시간 동안 유지하였다. 이 때 열처리로의 내부에 SmCo 영구자석을 설치하여 1 kOe의 자기장을 인가하였다. 최종적으로 일축이방성을 증가시키기 위한 수

\*Tel: (042)821-6233, E-mail: magkim@cnu.ac.kr

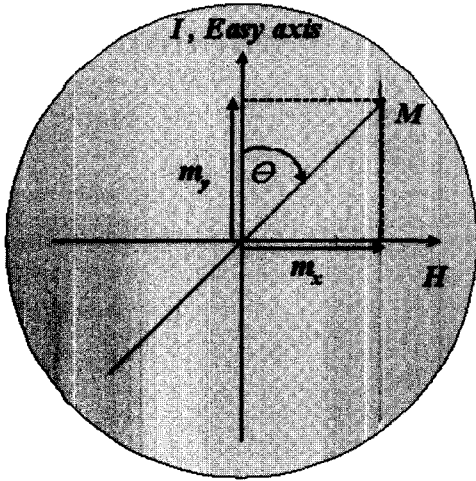


Fig. 1. Schematic diagram of in-plane coordinate system for measurements.

단으로 자화용이축 방향길이 10 mm, 폭 1 mm의 직사각형 패턴을 광리소그래피법을 이용하여 제작하였다.

### III. 결과 및 고찰

제작된 퍼말로이 박막의 자화상태 및 자기이방성을 확인하기 위하여 자화용이축 및 자화곤란축 방향으로 자기이력곡선을 측정하였다. Fig. 2에서 자화용이축 방향으로 측정된 자기이력곡선을 살펴보면 자화용이축과 자화곤란축 방향의  $m_x$  그래프는 자기장과 평행한 방향의 모멘트 성분으로 기존의 자기이력곡선 결과와 동일한 경향을 보인다.  $m_y$  그래프는 자기장에 수직인 방향의 모멘트 성분을 측정된 것이다. 자화용이축  $m_y$ 는  $m_x$ 에 비하여 크기가 작음을 알 수 있다. 따라서 자화용이축 방향으로 자기장을 인가할 경우 자화반전이 매우 급격히 이루어지며 자화반전은 자벽이동에 의해서 대부분 이루어진다고 판단된다. 반면에 자화곤란축 방향으로 측정된 자기이력곡선에서  $m_x$ 가 자기장  $\pm 5$  Oe 이내의 영역에서 완만히 감소할 때  $m_y$ 가 증가하며,  $m_x$  값이 0일 때 최대  $m_y$  값에 도달한다. 또한 최대  $m_y$  절대값이  $m_x$ 의 포화자화와 같기 때문에 자화곤란축 자화반전은 대부분 자화벡터의 회전으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나  $m_y$  변화추이를 살펴보면 자화반전이 자화벡터의 회전만으로 이루어지지 않음을 알 수 있다. 만약 단순히 자화벡터가 회전한다면  $m_y$ 의 부호가 바뀌지 않고 처음부터 끝까지 완만한 변화가 기대된다. Fig. 1에서 자기장을 감소시킬 때 자화곤란축 방향의  $m_y$  변화 방향을 화살표로 표시하였다.  $m_y$ 의 절대값이 최대가 된 후 절대값이 급격히 감소하면서  $m_y$ 의 부호가 (-)에서 (+)로 바뀌고 있다. Jen 등에 의하면[5] 인가 자기장이 시료의 정확한 자화곤란축에서 일정각도 이상 벗어날 경우 초기에는 단자구

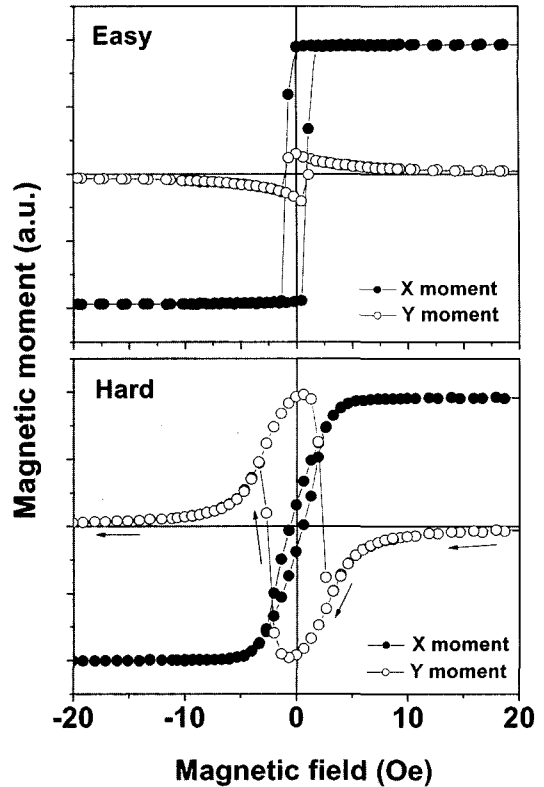


Fig. 2. Magnetic hysteresis loops of permalloy thin film measured in easy and hard axis directions.

에 근접한 상태에서 자화반전이 일어나는 동안 자화용이축 방향에 평행한 자벽을 갖고 모멘트의 방향이 반대인 띠(strip) 자구들이 핵생성된다. 인가자기장이 자구의 모멘트를 반전시키는 반전 자기장(전체 시료의 보자력과는 차이가 있다.),  $-H_{sw}$ 에 도달하기 전에는 자구의 모멘트가 회전하다가  $-H_{sw}$ 에서 자벽이동이 발생하면서 전체 시료의 자화반전이 이루어진다. 자구들의 자기모멘트들이 자화용이축에서 작은 각도로 벗어나 있기 때문에 자벽이동이 발생할 때  $m_x$ 는 완만하게 변화하는 반면  $m_y$ 는 측정결과처럼 급격하게 변화하게 된다. 본 실험에 사용된 퍼말로이 박막에서도 초기에는 자화 회전이 발생하고 이후 다자구 생성 및 자벽 이동이 이루어진다고 판단된다.

이방성자기저항과 박막의 면내 자화거동과의 상관관계를 조사하기 위하여 자기저항을 측정하였다. 자화용이축 방향에 평행하게 자기장을 인가한 경우에는 자화반전이 급격히 이루어지면서 자기저항도 극히 작아 잡음과 비슷한 수준으로 감지되었다. 이어서 자화곤란축방향으로 자기장을 인가하면서 자기저항을 측정하였다. Fig. 3(a)는 자기장을 감소시키면서 측정한  $m_x$ ,  $m_y$  및 MR 값을 보여준다. 강자성체의 자기저항은 자화벡터와 전류밀도 사이의 사잇각을  $\theta$ 라고 할 때 다음 식으로 표현된다.

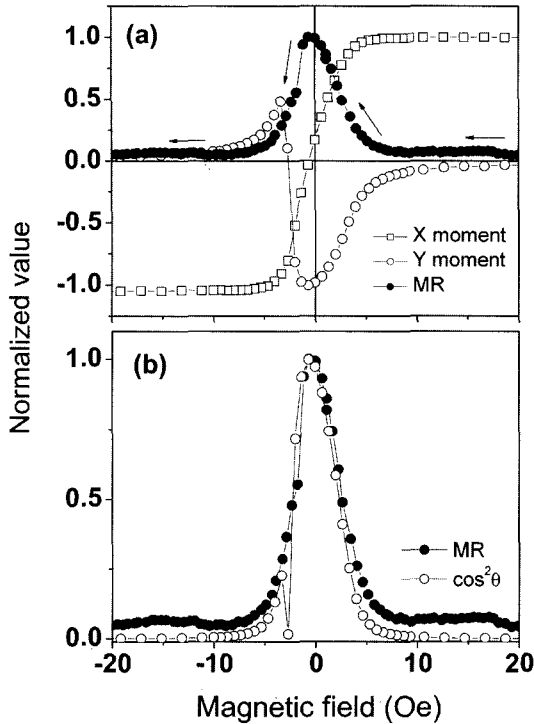


Fig. 3. (a) Normalized graphs of X, Y moment and MR; (b) Normalized MR and  $\cos^2\theta$ .

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} \sin^2\theta + \rho_{\parallel} \cos^2\theta = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cos^2\theta \quad (1)$$

여기에서  $\rho_{\perp}$ 는 전류에 수직하게 자화될 때의 비저항,  $\rho_{\parallel}$ 는 전류에 수평하게 자화될 때의 비저항,  $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ 이다. 전류를 자화용이축에 평행하게 인가하고 자기장을 자화용이축에 수직하게 인가할 때  $\theta$ 는  $\text{atan}(m_x/m_y)$ 로부터 계산된다.  $\rho_{\perp}$ 와  $\rho_{\parallel}$ 는 상수이므로 자기저항은  $\cos^2\theta$ 의 함수로 표현된다. Fig. 3(b)는 자기저항과  $\cos^2\theta$  값을 비교한 것이다. Fig. 3(a)에서  $m_x$ 는  $\pm 5$  Oe 구간에서 선형에 가깝게 감소한다. 이와 달리 자기저항비는 완만히 증가하다가 음의 자기장이 시작되는 부분에서 최대값을 갖고 이후 급격히 변화하는 경향을 보이는데 이러한 자기저항 거동은  $m_y$  절대값의 변화와 상당히 일치하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3(b)는 자기저항의 실험값과 식 (1)의 예측 결과와 비교한 것이다. 거의 모든 자기장에서 비슷한 거동을 보이고 있으나 음의 자기장에서 다자구 생성에 따른  $m_y$  부호 변화구간에서 이론값은 0에 가깝게 급격히 감소하다가 다시 증가하는 반면 실험값은 이론값에 비해 변화가 적고 완만하게 변하고 있음을 알 수 있다.

박막의 일축이방성을 증가시키고 자화반전 과정에서 다자구 생성에 의한 영향을 감소시키기 위하여 150°C에서 1 시간 고진공 자기장 열처리를 하고 이어서 용이축 방향으로 장축을 갖는 중횡비 10의 직사각형 패턴을 제작하고 자기이력

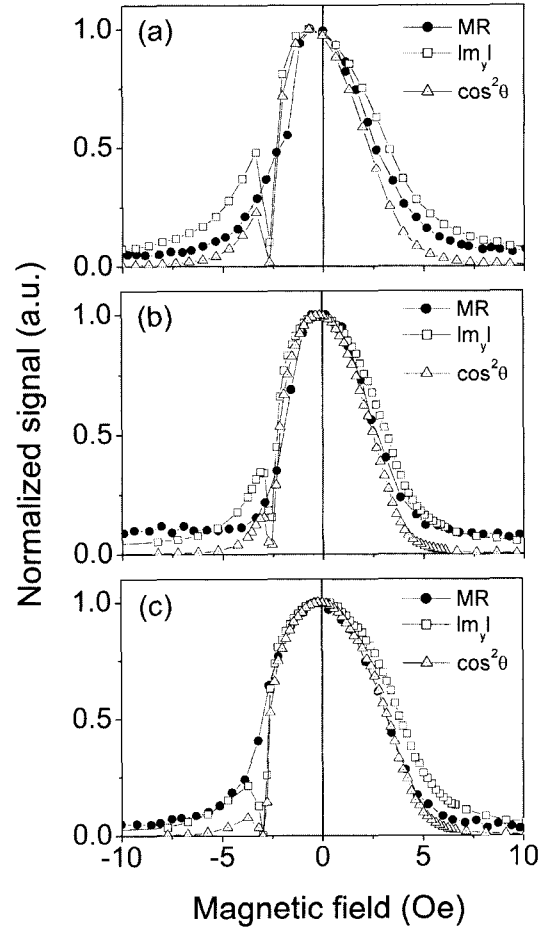


Fig. 4. Magnetoconductance,  $\cos^2\theta$ , and normalized  $|m_y|$  curves of (a) as-deposited film, (b) field annealed film, and (c) rectangular stripe pattern.

곡선 및 자기저항을 측정하였다. Fig. 4는 성막된 상태, 자기장 열처리 후, 패턴 샘플의 측정된  $m_y$ 의 절대값 ( $|m_y|$ ), 자기저항,  $\cos^2\theta$  값을 제시하였다. 성막된 상태에서는 측정된  $|m_y|$ , 자기저항,  $\cos^2\theta$  값들이 유사한 변화 패턴을 갖고 있으며 자기장 열처리와 패턴화에 따라 박막의 이방성이 증가하면서 각 데이터 사이의 차이가 감소하고 있다. 따라서 일축 이방성이 증가하고 박막이 보다 단자구 거동에 근접함에 따라 각 변수들의 차이가 감소하고 있음을 알 수 있다.

자기모멘트의 벡터 측정 결과 자기저항과 근접한 변화를 하는  $|m_y|$ 은 본 실험에서 얻어진 새로운 인자이다. 자화용이축 자기이력곡선의  $|m_y|$ 은 극히 작은 반면 자화곤란축 자기이력곡선의  $|m_y|$ 은 최대값이 포화값과 같아지므로 일부 자기장 구간을 제외하고 박막은 단자구 상태와 매우 근접한 자화반전 과정을 거친다. 자화곤란축 자기이력곡선의  $m_y$ 는 전류와 평행한 방향이므로 자기비저항의  $\rho_{\perp}$  성분과 관련된다. 일반적으로 자기비저항의  $\rho_{\parallel}$  성분과  $\rho_{\perp}$  성분의 크기는 다르며  $\rho_{\perp}$  성분보다  $\rho_{\parallel}$  성분이 상대적으로 더 크다고 알려져 있다[6]. 그

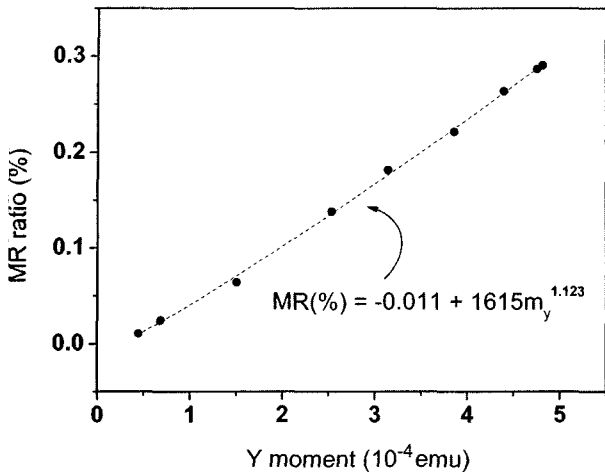


Fig. 5. MR variation as a function of  $|m_y|$  magnitude. The dash line is a fitting result.

리고 자기저항의 변화가 두드러진 저자기장 영역에서  $m_y$ 가  $m_x$ 보다 절대값이 크기 때문에 자기저항의 거동이  $|m_y|$ 의 거동과 부합하는 것은 직관적으로 타당하다. Fig. 4에서 측정된 자기저항과 일반화된  $|m_y|$  값 변화거동이 일치하는 것이 이를 뒷받침한다. 흥미로운 사실은  $\cos^2\theta$  값은 측정된 모멘트에서  $\theta$ 를 얻었지만 실측한 MR비를 완전하게 설명하지 못한다는 점이다.  $\cos^2\theta$  값은 이방성이 증가할수록 실제 측정값에 근접하지만 자벽이동이 발생하는  $-H_{sw}$ 에서 실제 측정값과 확연한 불일치를 나타내고 있다.

Fig. 1로부터  $\cos\theta = m_y/M$ 이므로  $\cos^2\theta$ 은  $m_y^2$ 에 비례한다. 그러나 Fig. 4에서  $\cos^2\theta$ 은  $m_y$ 에 비해 자기저항비와의 차이가 작다고 할 수 없다. 오히려 Fig. 4(b)에서는  $m_y$ 가 측정값에 더 근접하고 있다. 자기저항비가  $m_y$  또는  $m_y^2$  어느 쪽에 가까운지 여부를 조사하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. 자기장을 자화용이축에 평행한 방향으로 인가할 때 얻어지는 최대  $|m_y|$  값이 작고 자화곤란축에 평행한 방향으로 인가할 때 최대  $|m_y|$  값이 증가하는 특징을 활용하여 자기장 인가방향의 각도를 바꾸면서 각도에 따라  $|m_y|$ 의 최대값에서 자기저항 값을 측정하였다. 또한 측정 데이터를  $(m_y)^n$ 에 맞춤(fitting)을 실행한 결과  $m_y$ 의 멱수  $n$ 은 1.123으로 1에 더 근접함을 보여준다. 따라서 자기저항비가 최대  $|m_y|$  값에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. (1)식의  $\cos^2\theta$  값의 경우는 등방적인 원형의 단자구 상태를 가정하였다. 따라서 식 (1)에서 예측된 결과가 실제 현상으로부터 벗어나는 이유는 일축이방성을 유도하였으나 충분히 크지 않고 인가자기장도 자화곤란축 방향과 완전히 일치하지 않아서 다자구 생성에 따른 자벽이동의 영향을 크게 받고 있다. 더하여 스퍼터링으로 제작된 퍼멀로이 박막이 다결정 구조를 갖는 불완전성 등의

여러 가지 요인들에 의한 것으로 판단된다.

벡터 모멘트 측정으로 박막면내의 자화벡터를 결정하고 외부 자기장에 의한 자화벡터를 해석함으로써 퍼멀로이 박막을 포함한 강자성 박막의 자기저항을 해석하는데 활용할 수 있다고 판단된다. 그러나 전류에 평행한 모멘트 성분이 이방성 자기저항에 비례하는 구체적인 사실들은 일축이방성이 유도된 연자성 퍼멀로이 박막에 한정된 것이다. 강자성 박막의 자기적 특성은 조성, 구조 등 제작상의 변수에 의해 다양하게 변화하므로 이방성자기저항과  $m_y$ 의 상관관계를 보편화하기 위해서는 각각의 재료에 대한 자세한 연구가 필요하다.

#### IV. 결 론

마그네트론 스퍼터링법으로 제작한 퍼멀로이 박막에 일축 이방성을 유도한 후 벡터 자기모멘트 거동과 자기저항 거동을 측정하여 상호관계를 조사하였다. 박막 면 내부의 자기모멘트 거동은 벡터 모멘트를 측정하여 인가자기장에 의한 자화벡터 방향을 결정하였다. 인가한 전류벡터와 자화벡터의 사잇각으로부터 예측한 자기저항 거동은 측정결과와 상당부분 일치하였으나 자화반전 과정에서 발생하는 다자구 생성구간에서 실제 자기저항 거동으로부터 벗어나고 있다. 또한 실제 이방성자기저항 거동은 전류에 평행한  $m_y$  성분의 거동과 상당히 근접하고 있으며  $|m_y|$  값과 자기저항은 비례하였다. 따라서 일축이방성을 갖는 퍼멀로이 박막의 전류에 평행한 모멘트 성분으로 이방성자기저항 거동을 예측할 수 있다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 충남대학교 고기능성 자성재료 연구센터에 의해 지원되었기에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. G. Zhu and D. J. O'Connor, IEEE Trans. Mag., **32**, 54 (1996).
- [2] S. W. Yuan, IEEE Trans. Mag., **30**, 3849(1994).
- [3] T. Yeh and W. F. Witcraft, IEEE Trans. Mag., **31**, 3131(1995).
- [4] M. Vieth, H. van den Berg, and W. Bartsch, IEEE Trans. Mag., **30**, 939(1994).
- [5] S. U. Jen and W. L. Chen, J. Appl. Phys., **87**(12), 8640 (2000).
- [6] T. R. McGuire and R. I. Potter, IEEE Trans. Mag. MAG-11, 1018 (1975).

## **Anisotropic Magnetoresistance Analysis of Permalloy Film Using 2-dimensional Magnetization Vector Measurement**

**Young-woo Lee, Yongkang Hu, Jae-joon Lim, Cheol Gi Kim, Chong Oh Kim\***

*Division of New Materials Engineering, Chungnam National University  
220 Gung-dong, Yousung-gu, Daejeon 305-764, Korea*

**Tae Sick Yoon**

*Research Center for Advanced Magnetic Materials, Chungnam National University  
220 Gung-dong, Yousung-gu, Daejeon 305-764, Korea*

(Received 26 June 2004, in final form 27 August 2004)

We measured in-plane 2 dimensional magnetization vector using two pick-up coil sets and investigate the relationship between magnetization vector and anisotropic magnetoresistance. We can determine magnetization vector by measuring magnetic moment in x and y direction simultaneously. As the uniaxial magnetic anisotropy of permalloy film increases, magnetoresistance approaches the expectation which is calculated from the angle between current vector and magnetization vector. Magnetoresistance ratio is linearly proportional to the y moment magnitude which is parallel to the current direction.

**Key words :** anisotropic magnetoresistance, vector pick-up coil, permalloy, uniaxial anisotropy