

## 박막수직방향에서 면방향으로 회전하는 인가자기장에 대한 다층박막 [Pt/Co]<sub>N</sub>-IrMn의 교환바이어스의 각도의존특성

김순섭 · 임혜인 · 이장로 \*

숙명여자대학교 물리학과, 서울 용산구 청파동, 140-742

이상석 · 황도근

상지대학교 동서의료공학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702

(2008년 8월 12일 받음, 2008년 8월 20일 최종수정본 받음)

마그네트론 스퍼터링방법으로 제작한 다층박막 [Pt/Co]<sub>N</sub>-IrMn에 측정자기장이 박막면에 수직인 방향에서 면방향으로 각도  $\theta$  방향으로 인가될때, 교환결합바이어스( $H_{ex}$ )와 보자력( $H_c$ )의 각도의존성이 측정되었다. 자기이력곡선은 인가 자기장축 뿐 아니라 자회축에 대하여도 그 원점이 이동하여 비대칭을 나타내었다.  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 각도 $\theta$ 에 대하여 각각  $1/\cos\theta$ 와  $1/|\cos\theta|$  의존성을 나타내며, 이와 같은 각도의존특성은 자기장냉각(박막면에 수직방향)을 통하여 생긴 강한 수직자기이방성에 기인하는 것을 알 수 있다.

주제어 : 교환결합바이어스, 보자력, 각도의존특성, 자기장냉각

### I. 서 론

교환결합된 강자성체/반강자성체(FM/AFM) 이중층이 AFM 층의 Neel온도 이상에서 자기장냉각할 때 FM/AFM 경계면에 유도된 이방성이 자기장축방향을 따라 자기이력곡선의 원점의 이동을 생기게 하여 즉 교환결합바이어스(exchange coupling bias;  $H_{ex}$ )와 보자력(coercivity:  $H_c$ )의 증가가 나타나게 된다[1-7].

지난 10년 동안 이러한 구조가 주로 스핀밸브 또는 자기터널구조를 이용한 자기센서의 기술적 응용 때문에 집중적으로 연구되었다[8, 9]. 보통은 교환결합바이어스는 면내 이방성을 갖는 FM/AFM 이중층 구조에서 나타났다. 그러나 최근에는 교환결합바이어스효과는 연속적이고[10-12] 나노구조 다층박막[13] 둘 다에서 박막면에 수직인 방향에서도 관측되었다. 몇몇 구조에서는 자기장냉각(field cooling) 방향에 따라서 면내 방향 혹은 면에 수직인 방향의 교환결합바이어스를 나타낼 수 있다. 즉, 이러한 수직자기이방성현상은 자기장 센서, 자기기록 기술, 자기램(MRAM)장치들에 유용하게 응용 될 수 있다. 수직교환결합바이어스를 나타내는 구조 중에는 CoO, FeCl<sub>2</sub>, NiO, FeMn 또는 IrMn과 같은 AFM으로 교환결합한 [Pt/Co] 또는 [Pd/Co] 다층박막(ML) 등이 있다.

교환바이어스의 대칭성을 비롯한 여러가지 다른 특성들이, 자기장냉각방향과 다른방향을 따라 자기장을 인가하면서 자기이력곡선을 측정하면, 즉 교환바이어스의 각도의존성 측정

으로부터 결정될 수 있다[1, 2, 8].

대부분의 FM/AFM 이중층 구조에서는 박막면이 그것의 형상 이방성 때문에 보통은 자화용이축이므로 교환결합바이어스의 각도의존성은 박막면내에서 자기장냉각방향에 대하여 여러가지 각도  $\phi$ 방향을 이루는 자기장이 가해질 경우에 연구되었다. 이 결과는  $H_c$ 가  $\phi = 0$ 과  $\phi = \pi$ 에서 극대,  $\phi = \pi/2$ 와  $\phi = 3\pi/2$ 에서 극소를 나타내는 일축대칭성(uniaxial symmetry)을 나타낸다.  $H_{ex}$ 는 일방향 대칭성(unidirectional symmetry)을 나타내어  $H_{ex}(\phi)$ ,  $H_{ex}(\phi = 0) \sum b_n \cos(n\phi)$ 와 같이 표현된다. 여기에서 계수  $b_n$ 의 차수는 다층박막계에 따라 달라진다.  $H_{ex}(\phi)$ 의 단순한  $\cos\phi$  의존성은 비정질-CoMoB/CoO[3]와 비정질 FeNiB/CoO[4]를 비롯한 몇 개의 구조에서 관측되었으며, 한편 FeNi/CoO[5, 6]와 FeNi/CrMnPt[7] 구조에서는  $H_{ex}$ 의 각도 의존성을  $\cos 3\phi$  혹은 그 이상의 고 차수항으로 설명할 수 있었다. Ambrose 등[5]은 그 차이를 FM층의 결정 이방성때문이라고 설명하였다. 또한 Xi 등[7]은 Stoner-Wohlfarth 모형을 사용해서  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 각도의존성을 수치적으로 적합하도록 맞출 수 있었다.

Fig. 1은 앞에서 X. W. Wu 등[3-7]이 보고한 내용과 비슷한 특성의 한 예를 보여주는 그림으로 박막면내에서 자기장냉각방향과 각도  $\phi$ 방향으로 자기장을 걸어주면서 측정한  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 각도  $\phi$  의존성을 나타낸다.  $H_c$ 는 자기장냉각축 방향을 따라 극대를 갖는 이중 대칭성(two-fold symmetry)를 가지며 인가자기장이  $\phi = 0$ 과  $\phi = \pi$ 에서부터 회전할 때  $H_c$ 는 급격히 감소하다가, 자기장방향이 자기장냉각축 방향과 수직

\*Tel: (02) 710-9404, E-mail: jrrhee@sm.ac.kr

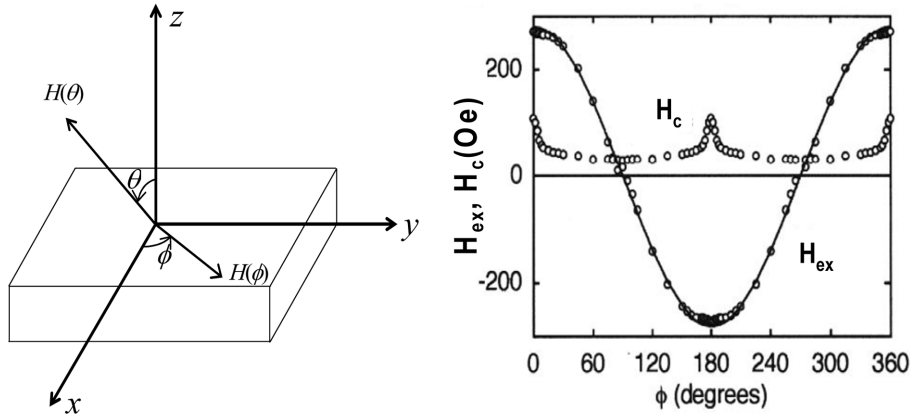


Fig. 1. Angular dependence of  $H_{ex}$  and  $H_c$  for in-plane hysteresis loops measured at  $\phi$  with respect to the field-cooling direction (x-axis) as shown in the figure. The angular dependence of the exchange field  $H_{ex}$  and the coercivity  $H_c$  where the solid line corresponds to  $H_{ex}(\phi) = H_{ex}(0)\cos\phi$ .

이 되면 극소 값을 나타낸다. 이와는 대조적으로  $H_{ex}$ 의 각도 의존성은 실선으로 나타낸 것처럼 단순  $\cos\phi$  함수로 기술할 수 있는 일방향 대칭성을 나타낸다.

본 논문에서는 수직교환결합바이어스를 갖는 다층박막 Ta50/[Pt15/Co( $t_{Co}$ )]<sub>4</sub>-IrMn50/Ta50(Å단위)을 스퍼터링 방법으로 제작하고 Ambrose 등[5]과는 다르게 박막면에 수직인 방향으로 자기장냉각한 후, 박막면의 수직방향에서 박막면 방향으로 각도  $\theta$ 방향으로 측정자기장이 인가될 때  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 각도의 의존특성을 조사하고자 한다.

## II. 시료제작 및 자화측정

본 연구에서는 6개의 타겟이 장착된 메인 챔버와 load-lock 챔버를 갖는 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템으로 Fig. 2와 같이 Si/SiO<sub>2</sub>/Ta/Pt/[Pt/Co]<sub>N</sub>/IrMn/Ta 구조의 박막을 제작하였다. 기판은 1000 Å의 산화막이 형성된 직경 6인치의 P-형 (100) Si wafer를 1.4×1.4 cm<sup>2</sup>의 크기로 절단하고 표면의 유기물이나 이물질을 제거하기 위해 트리클로에틸렌 (CHCl<sub>3</sub>)에 담가 먼저 30분 동안 초음파 세척 한 후 계속하여 아세톤과 알코올로 초음파 세척하고, 마지막엔 증류수로 세척하여 건조 하였다. 박막 제작시 사용한 타겟은 Pt, Ta, Co, Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>이며, 다층박막인 [Pt/Co]의 Pt와 Co 사이의 이동 시간을 같게 하기 위하여 Pt와 Co의 타겟 위치를 서로 마주보게 하였다. 증착시 각 타겟의 증착율은 Ta: 1.45 Å/s, Pt: 1.14 Å/s, Co: 0.95 Å/s, IrMn: 1.16 Å/s 이었으며, 박막 시료는 실온에서 초기진공도 2×10<sup>-8</sup> Torr 이하, Ar 부분압력 2 mTorr로 하여 증착 하였다.

타겟과 기판 사이의 거리는 8 cm를 유지하였으며, 박막형 성시 독립된 증착층 형성을 위하여 셔터를 사용하여 각 타겟의 플라즈마 혼합을 방지하였다.

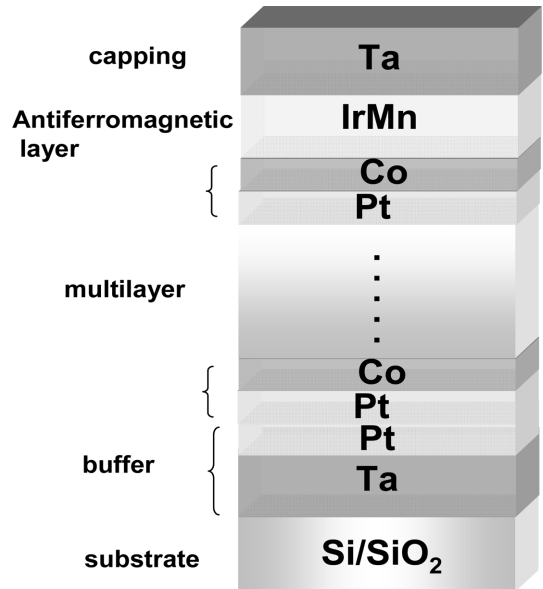


Fig. 2. Schematic illustration of structure of a multilayer.

자화(magnetization)측정은 시료진동형자기계(vibrating sample magnetometer) 또는 Hall 전압(extraordinary Hall voltage) 측정장치를 사용하였다. 자화측정은 박막면에 수직인 방향으로 수직자기이방성을 유도하기 위하여 진공도 2×10<sup>-6</sup> Torr에서 박막면에 수직인 방향으로 자기장 2 kOe를 걸어주고 550 K에서 1시간 열처리한 후 서서히 자기장냉각한 다음 실온에서 자기장방향을 따라 측정하였다. 이력곡선의 각도의 존성 측정시 시료 및 픽업코일과 인가자기장사이의 각도의 정확성은 0.1° 이상을 유지하였다.

## III. 결과 및 고찰

수직교환이방성을 갖는 Ta50/Pt4/[Pt15/Co3]<sub>4</sub>/IrMn50/Ta50

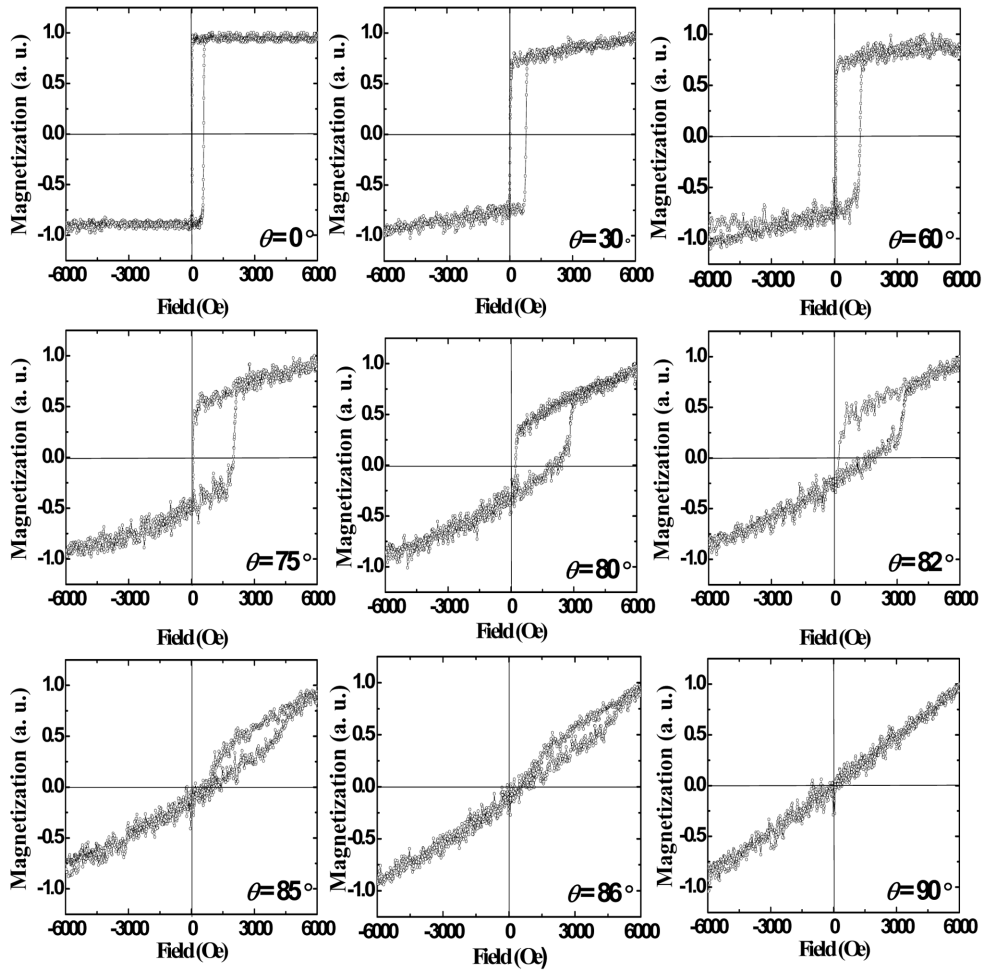


Fig. 3. Hysteresis loops measured at  $\theta =$  (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $75^\circ$ , (e)  $80^\circ$ , (f)  $82^\circ$ , (g)  $85^\circ$ , (h)  $86^\circ$ , (i)  $90^\circ$  from the perpendicular-to-films direction in the Ta50/Pt4/[Pt15/Co3]<sub>n</sub>/IrMn50/Ta50 (in Å) multilayers with out-of-plane anisotropy.

(Å) 구조의 다층박막에 대하여 박막면에 수직인 방향에서 박막면 방향으로 각도  $\theta$  방향으로 인가한 자기장에 대하여 각도  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 82^\circ, 85^\circ, 86^\circ, 90^\circ$ 에서 측정된 자기 이력곡선들을 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 자기장축의 자기장의 크기가 앞에서의 Fig. 1의 경우에 비해 큰 것을 알 수 있다.

박막면에 수직인 방향(자기장냉각방향)에서 각  $\theta$  방향으로 박막면 방향으로 걸어준 자기장에 대하여 측정된 이력곡선의 모습은 앞에서의 박막면내에서 각  $\phi$  방향으로 인가한 자기장으로 측정된 이력곡선과는 판이하게 다르다.

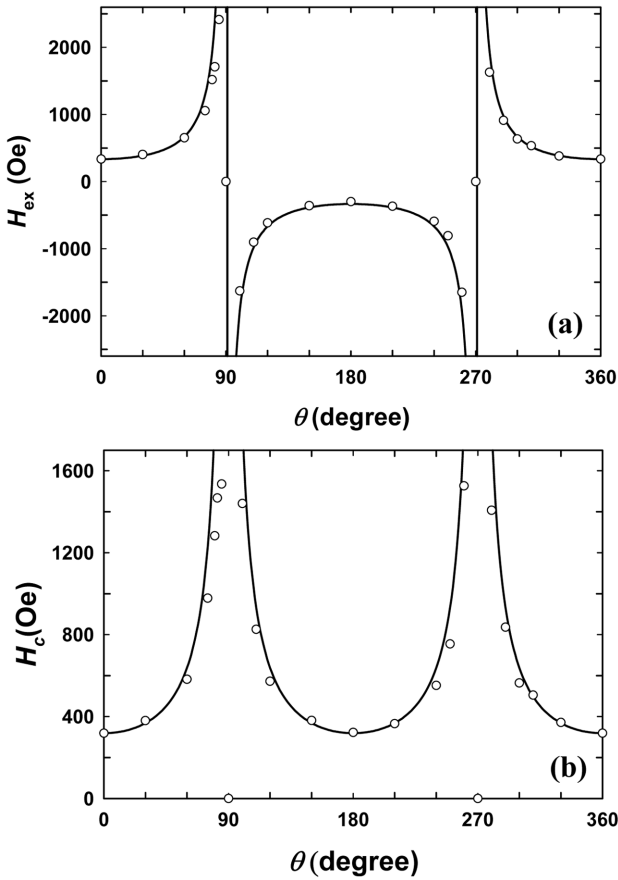
가장 주목할 만한 것은, 이 자기이력곡선이 중간각도에서 인가자기장축(x축)과 자화축(y축) 둘 다를 따라 이동하며 비대칭을 나타낸다는 것이다. 이러한 비대칭성은 특히 각  $75^\circ, 80^\circ, 82^\circ, 85^\circ, 86^\circ$  등의 큰 각도에서 분명하게 나타나며,  $\theta = 90^\circ$ 에서는 자기장축과 자화축 양축을 따라 어느 축 방향으로도 이동이 없는 자화곤란축 자기이력곡선을 나타낸다.

교환결합비어스장은 자기장축 방향을 따라 자기이력곡선의 중심이 이동한 그 이동량으로 측정되며 보지력은 이 이력곡선의 중간 반폭치로 측정한다.  $M$ (자화)축 방향을 따라 이동이 없는 대칭성을 갖는 자기이력곡선의 경우에는  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 비교적 간단히 즉  $M=0$ 일 때 대응하는 2개의 자기장 값으로 쉽게 결정할 수 있다. 더 일반적인 정의에 의하면  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 식

$$H_{ex} = -\frac{H_{SR} + H_{SL}}{2}, H_c = \frac{H_{SR} - H_{SL}}{2}$$

으로 구할 수 있다. 여기에서  $H_{SL}$ 과  $H_{SR}$ 은 각각 자기이력곡선의 왼쪽과 오른쪽 부분에서의 스위칭자기장 값이다. 이 경우  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 자기이력곡선의 중심에서 구해진다. 이 정의에서 구한  $H_c$ 는 항상 양의 값을 가지며  $H_{ex}$ 는 양 또는 음의 값을 가질 수 있다.

$30^\circ$  간격으로  $0^\circ$ 에서  $360^\circ$ 까지 측정된 자기이력곡선으로부터 구한  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 각도  $\theta$  의존성을 나타낸 그림이 Fig. 4



**Fig. 4.** (a) Angular dependence of the exchange bias field. The solid line corresponds to  $H_{ex}(\theta) = H_{ex}(0)/\cos\theta$ . (b) Angular dependence of the coercivity. The solid line corresponds to  $H_c(\theta) = H_c(0)/|\cos\theta|$ .

이다.

이 그림에서 보듯이 자기장을 박막면에 수직방향 (자기장 냉각방향)에서 박막면내 방향으로 각  $\theta$ 방향으로 인가하면서 측정된  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 값은 각도에 따라서 단조롭게 증가한다. 이러한 각도의존성과 자화축( $M=0$ )에 대한 자기이력곡선의 비대칭성은 인가자기장이 박막면과 수직방향이 아닐때 정량적으로는 반자기장과 수직이방성 에너지 때문이라 할 수 있다.

외부인가자기장이 박막면에 수직인 자기장냉각방향에서 박막면 방향을 향하고 있을 때 인가자기장이 포화자기장을 초과하면 이때 자화는 자기장 방향으로 정렬한다.

그러나 자화용이축이 자기장냉각방향이므로 인가자기장이 감소하면 시료의 자화는 자화용이축 방향으로 되돌아 오려고 하는 성향이 있다. 인가자기장의 박막면 수직방향성분은  $H\cos\theta$ 가 되며 인가자기장 방향이 자기장냉각방향과 각  $\theta$ 를 이루면 스위칭자기장은 다음과 같이 주어진다.

$$H_{SR(\theta)} = H_{SR(\theta=0)}/\cos\theta, \quad H_{SL(\theta)} = H_{SL(\theta=0)}/\cos\theta.$$

즉  $H_{ex}$ 와  $H_c$  둘 다  $1/\cos\theta$  의존성을 나타내게 된다. Fig. 4

에서와 같이 실선으로 표시된  $1/\cos\theta$  의존성이  $H_{ex}$ 와  $H_c$  둘 다를 매우 잘 설명해주는 것을 알 수 있다. 그림에서의 실선이

$$H_{ex}(\theta) = H_{ex}(0)/\cos\theta, \quad H_c(\theta) = H_c(0)/|\cos\theta|$$

에 잘 대응함을 알 수 있다.

보자력의  $1/\cos\theta$  의존성을 관찰하기 위해서는 강한 이방성이 필요하다. 앞에서 언급했듯 이것은 강력한 고유이방성 (intrinsic anisotropy)를 갖는 덩어리 단결정의 경우에서만 관찰되었다[14, 15].

이와 같은  $1/\cos\theta$  스위칭장 의존특성은 강한 일축이방성이 각각 고품질 에피탁시얼 박막에서 또 중횡비 높은 시료 때문에 생기게 되는 에피탁시얼  $\text{CrO}_2$  박막[16]과 Ni 나노선[17]에서도 보고 되었다.

본 연구에서의 반강자성 IrMn에 의해서 교환결합된 다층박막에서는 일방향교환이방성과 일축이방성 둘 다를 포함하는 강력한 수직이방성이 자기장냉각과정을 통하여 생긴 것이다. 즉  $[\text{Pt}(15)/\text{Co}(t_{\text{Co}})]_4\text{-IrMn}(50)(\text{\AA})$  다층박막의 박막 면에 수직 한 방향에서 박막면 방향으로 각도  $\theta$ 방향으로 인가자기장에서 의해 측정된  $H_{ex}$ 의 각도의존성은 박막면 내에서  $\phi$ 방향으로 회전하는 인가자기장으로 측정된 경우와는 다른 거동을 보이는 것을 알 수 있다.  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 둘 다 박막면에 수직방향 (자기장냉각방향)과 박막면을 향하는 인가측정자기장 사이의 각도  $\theta$ 에 대하여  $1/\cos\theta$  의존성을 나타내었다. 이와 같은  $1/\cos\theta$  의존성은 자기장냉각방향을 따라 생긴 자기이방성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

스피터링 방법으로 제작한 다층박막  $[\text{Pt}(15)/\text{Co}(t_{\text{Co}})]_4\text{-IrMn}(50)(\text{\AA})$ 에 대하여  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 박막면에 수직 한 방향(자기장냉각방향)에서 박막면 방향으로 각도  $\theta$ 로 인가한 자기장에 대한 각도의존성 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 박막면에 수직 한 방향에서 각  $\theta$ 방향으로 박막면 방향으로 걸어준 자기장에 대하여 측정된 이력곡선의 모습은 박막면내에서 각  $\phi$ 방향으로 인가한 자기장으로 측정된 이력곡선과는 판이하게 다르다. 이 자기이력곡선이 중간각도에서 인가자기장축과 자화축 둘 다를 따라 이동하며 비대칭을 나타낸다.
2. IrMn으로 교환 결합된 다층박막에서는 일방향 교환이방성과 일축 교환이방성 둘 다를 포함하는 강력한 수직이방성이 자기장냉각과정을 통하여 형성된다.
3.  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 둘 다 박막면 수직방향(자기장냉각방향)과 측정자기장 사이의 각도  $\theta$ 에 대하여  $1/\cos\theta$  의존성을 나타낸다. 이 의존성은 자기장냉각방향을 따라 생긴 자기이방성에

기인한 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2007-313-C00241).

### 참고문헌

[1] A. E. Berkowitz and K. Takano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**, 552 (1999).

[2] R. L. Stamps, *J. Phys. D* **33**, R247 (2000).

[3] X. W. Wu, T. Ambrose, and C. L. Chien, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2176 (1998).

[4] J. W. Cai, K. Liu, and C. L. Chien, *Phys. Rev. B* **60**, 72 (1999).

[5] T. Ambrose, R. L. Sommer, and C. L. Chien, *Phys. Rev. B* **56**, 83 (1997).

[6] N. J. Gokemeijer, T. Ambrose, and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 4270 (1997).

[7] H. Xi, M. H. Kryder, and R. M. White, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2687 (1999).

[8] B. Dieny, V. S. Speros, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).

[9] S. Tehrani, J. M. Slaughter, M. Deherrera, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, D. M. Durlam, R. W. Dave, J. Janesky, B. Butcher, K. Smith, and G. Grynkewich, *Proc. IEEE* **91**, 703 (2003).

[10] S. Maat, K. Takano, S. S. P. Parkin, and E. E. Fullerton, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 087202 (2001).

[11] S. M. Zhou, L. Sun, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Phys. Rev. B* **69**, 024408 (2004).

[12] Z. Y. Liu and S. Adenwalla, *J. Appl. Phys.*, **94**, 1105 (2003).

[13] J. Sort, B. Dieny, M. Fraune, C. Koenig, F. Lunnebach, B. Beschoten, and G. Güntherodt, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3696 (2004).

[14] S. Rich, S. Shtrikman, and E. Treve, *J. Appl. Phys.*, **36**, 140 (1965).

[15] D. V. Ratnam and W. R. Buessem, *J. Appl. Phys.*, **43**, 1291 (1972).

[16] F. Y. Yang, C. L. Chien, E. F. Ferrari, X. W. Li, G. Xiao, and A. Gupta, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 286 (2000).

[17] L. Sun, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4429 (2001).

## Characteristics of the Angular-dependent Exchange Coupling Bias in Multilayer [Pt/Co]<sub>N</sub>-IrMn with Toward-in Plane Applied Fields

S. S. Kim, H. I. Yim, and J. R. Rhee\*

*Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea*

S. S. Lee and D. G. Hwang

*Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Kangwon-do 220-702, Korea*

(Received 12 August 2008, in final form 20 August 2008)

The angular dependence of the exchange bias ( $H_{ex}$ ) and coercivity ( $H_c$ ) in multilayer [Pt/Co]<sub>N</sub>-IrMn with applied measuring field rotated toward in-plane at angle  $\theta$  from perpendicular-to-plane, has been measured. Multilayer films consisting of Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(50)/Pt(4)/[Pt(15)/Co( $t_{Co}$ )]<sub>N</sub>/IrMn(50)/Ta(50) (in Å) were prepared by magnetron sputtering under typical base pressure below  $2 \times 10^{-8}$  Torr at room temperature. Magnetization measurements were performed on a vibrating sample magnetometer and extraordinary Hall voltage measurement systems after cooling from 550 K under a field of 2 kOe applied along the perpendicular to film direction. The hysteresis loop shifts from the origin not only along the field axis but also along the magnetization axis.  $H_{ex}$  and  $H_c$  show a  $1/\cos\theta$  and  $1/|\cos\theta|$  dependence on the angle ( $\theta$ ) between the applied measuring field and the perpendicular-film direction, respectively. This  $1/\cos\theta$  dependence can be accounted for by considering the angular dependence of strong out-of-plane magnetic anisotropy introduced during the field cooling.

**Keywords** : exchange bias, coercivity, angular dependence, field cooling