

## 강자성 공명에 의한 Exchange Bias 연구

유용구\*

한국전자통신연구원 단말부품연구부, 대전시 유성구 가정동 161, 305-350

박남석

충주대학교 전기전자공학부, 충주시 이류면 검단리 123, 380-702

민성기 · 유성초

충북대학교 물리학과, 청주시 흥덕구 개신동 산48, 360-763

(2005년 9월 30일 받음, 2005년 10월 18일 최종수정본 받음)

강자성 공명 측정을 통하여 다양한 층 구성을 갖는 교환 바이어스 박막들의 교환 결합 특성에 대해 연구하였다. 공명자기장의 각도의존 실험을 통하여 일축방향이방성 자기장과 일축이방성 자기장을 구하여 분석하였다. NiFe 단일 박막과 비교하여 교환 바이어스된 NiFe/IrMn, IrMn/NiFe/IrMn, NiFe/IrMn/CoFe 박막들은 큰 일축방향이방성 자기장을 나타내었으며, 일축이방성 자기장 또한 큰 값을 나타내었다. 그러나 NiFe/Cu/IrMn의 경우, Cu의 두께가 두꺼울 때는 매우 작은 일축방향이방성 자기장을 나타내었으며, NiFe 단일 박막과 비슷한 크기의 일축이방성 자기장을 나타내었다. NiFe/IrMn/CoFe 박막의 경우 NiFe와 CoFe 강자성층들에 의해 두 개의 공명 자기장이 나타났다. 그 외에 공명 자기장의 선포에 관한 분석이 교환 바이어스 특성과 관련하여 논의되어졌다.

**주제어** : 교환 바이어스, 강자성공명, 일축방향이방성, 일축이방성

### I. 서 론

교환 바이어스(exchange bias) 효과는 강자성/반강자성 이층 박막에서 계면 상호작용에 의해 나타나는 현상으로 GMR 헤드의 스핀밸브 구조에서 많이 이용되어져 왔다[1]. 교환 바이어스 효과는 다양한 형태의 스핀밸브 구조 개선을 위해 많은 연구가 진행되어져 왔는데, 주로 반강자성층의 종류에 따른 교환 결합 세기 및 열적 안정성 등에서 많은 연구가 이루어져 왔다[2, 3]. 또한 알려진 결과들에 의하면 교환 바이어스 효과는 강자성과 자성층간의 계면 스핀 배열에 의해 그 특성이 결정되어지는데, 이에 따라 박막 성장에 따른 구조적 영향 즉, 두께, 씨앗층 및 열처리 변수에 따른 연구가 진행되어져 왔다[4, 5]. 교환 바이어스의 물리적 기원은 Meiklejohn과 Bean에 의해 처음으로 연구되어졌다[6]. 그러나 그들이 제안한 교환결합 세기는 실험값 보다  $10^2$  정도 큰 값을 나타내어 후에 이를 개선하기 위한 많은 이론 및 실험적 연구가 진행되어졌다. Mauri에 의해 제안된 planar domain wall 모델은 교환 에너지를 줄이기 위해 반강자성층 내에 자구벽을 형성하는데, 이로 인하여 교환 결합 세기가 감소한다고 보고하였다[7]. 한편, Malozemoff에 의해 제안된 random field 모

델은 계면의 거칠기와 구조적 결함들이 반강자성층 내에 다양한 크기의 결정립을 형성하게 하고, 이에 따른 반강자성층의 스핀 정렬의 불균형으로 인하여 교환결합 세기가 감소한다고 보고하였다[8]. 대부분의 이론 및 실험적 연구에 의하면 교환 바이어스의 세기는 반강자성층 혹은 강자성층 내에 자구 형성 및 그들의 두께에 의존한다는 사실들이 밝혀졌다[9, 10].

강자성/반강자성 이층 박막에서 교환결합 세기는 다양한 측정 방법을 통하여 얻을 수 있는데, 대표적인 방법은 VSM, MOKE 등으로부터 얻을 수 있는 자기이력곡선의 이동으로부터 교환 바이어스의 크기를 측정할 수 있다[4, 5]. 그러나 이와 같은 방법은 측정 자기장의 인가 방향에 따라 자기이력곡선이 비대칭을 나타내어 정확한 측정값을 얻을 수 없다[11, 12]. 이러한 비대칭은 자기장 인가 방향에 따른 비가역 스핀 반전에 의해 나타난다. 따라서 최근 연구자들은 강자성공명(FMR)과 같은 방법을 이용하여 정확한 교환 바이어스의 크기를 결정하여 왔다[13]. 강자성 공명 측정법은 자기이방성 연구에 적합한 측정법으로 강자성 시료의 내적 특성에 의한 이방성 연구에 많이 이용되어져 왔다[14].

본 연구에서는 교환 바이어스를 나타내는 다양한 형태의 이층 혹은 삼층 박막에서의 교환 바이어스의 크기와 일축이방성 크기를 강자성 공명 측정으로부터 분석하였다.

\*Tel: (042) 860-5222, E-mail: yonggoo@etri.re.kr

## II. 실험 방법

본 연구에 사용된 시료는 IrMn(10 nm)을 반강자성층으로 하고, NiFe(5 nm)과 CoFe(5 nm)를 강자성층으로 하였다. 기판은 Si(100)를 사용하였으며, 씨앗층과 capping층은 Ta (5 nm)로 하였다. 다층박막들은 magnetron sputtering 법으로 제작하였다. 증착 동안 강자성층 내에 일축이방성을 유도하기 위하여 200 Oe 정도의 자기장을 인가하였다. 챔버의 기본 압력은  $5 \times 10^{-8}$  torr 이하였고, 증착은  $2 \times 10^{-3}$  torr에서 수행하였다. 박막 표면의 균일성을 유지하기 위하여 각 원소들의 증착율은 0.1 nm/sec 이하를 유지하였다. 제작된 박막의 층 구조는 다음과 같다. (1) NiFe/IrMn, (2) IrMn/NiFe/IrMn, (3) NiFe/Cu(t)/IrMn ( $t=0.8, 1.8$  nm), (4) NiFe/IrMn/CoFe. 비교를 위하여 교환결합이 없는 단일 NiFe 박막을 같은 조건으로 제작하였다. IrMn/NiFe/IrMn 박막은 강자성 공명 실험시 강자성층 위·아래에 같은 층을 위치하여 표면 이방성의 동일성을 주기 위하여 제작하였다. NiFe/Cu/IrMn 박막은 강자성/반강자성층 사이에 Cu 비자성 금속층을 삽입하여 교환 바이어스 세기를 조절하고자 하였다. NiFe/IrMn/CoFe는 반강자성층 위·아래에 다른 종류의 강자성층을 위치시켰을 때 나타나는 교환 바이어스의 효과를 관측하고자 제작하였다.

강자성 공명 실험은 JEOL JES-TE300 ESR spectrometer를 사용하여 9.4 GHz에서 수행하였다. 강자성 공명 실험을 통하여 공명 자기장( $H_r$ ) 및 공명 흡수선의 선폭( $\Delta H$ )을 얻을 수 있는데, 공명 자기장은 Fig. 1과 같이 공명 흡수선을 적분 하였을 때 y축의 최대값을 의미하며, 선폭은 적분의 반치폭(FWHM)에 의해 결정되어질 수 있다. 공명 자기장의 각도

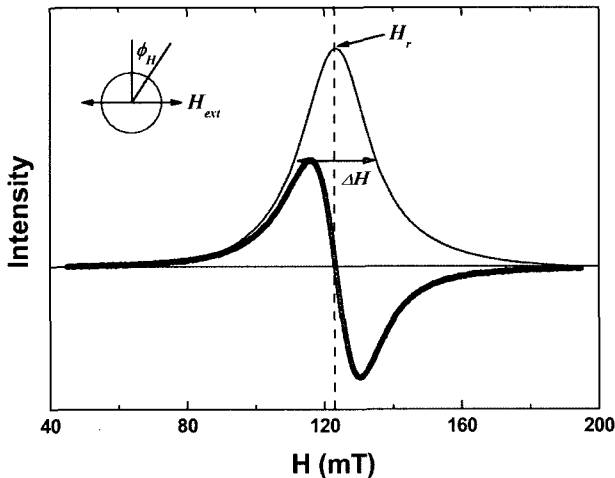


Fig. 1. Resonance absorption data of NiFe/IrMn thin film (dot) and the integrated curve (solid line). The measurement was performed at  $\phi_H=0^\circ$ . The inserted graph indicates the angle between the external field and sample.

의존성 실험은 박막을 인가 자기장에 수평한 방향으로 회전 하면서 측정하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

강자성 공명 실험을 통하여 교환 바이어스된 박막들의 각도에 따른 공명 자기장( $H_r$ )의 변화를 측정하였다.  $H_r$ 의 각도에 따른 변화는 박막의 자기이방성 및 특성 자기장 분포를 나타낸다. Fig. 2(a)는 교환 바이어스된 NiFe/IrMn과 IrMn/NiFe/IrMn 박막의 각도에 따른  $H_r$ 의 분포를 나타낸다. 비교를 위하여 NiFe 단일 박막의 데이터를 삽입하였다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 NiFe 단일 박막은 각도에 따라  $H_r$  값이 큰 변화를 보이지 않았으나, 교환 바이어스된 박막들은 명백한 일축방향성(unidirectional) 거동을 나타내었다. Fig. 2(b)는 이들을 polar 좌표계로 표현한 것이다. Polar 좌표계의 그림

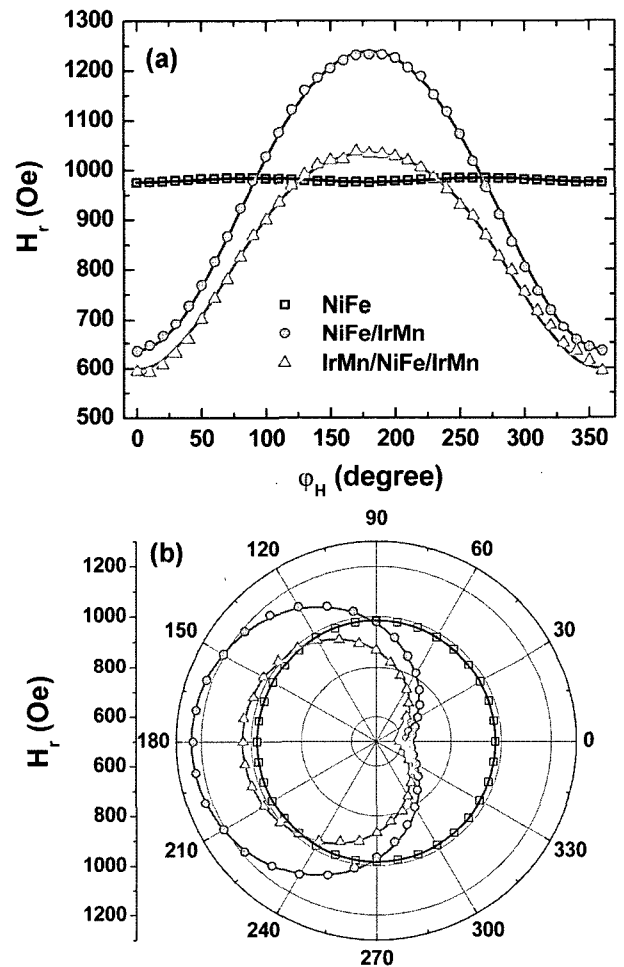


Fig. 2. (a) Angular dependence of resonance field of NiFe/IrMn and IrMn/NiFe/IrMn thin films. Data of an unbiased single NiFe thin film was inserted to comparison. (b) indicates the re-plotted result by polar coordination.

을 보면 NiFe 단일 박막의 경우  $H_r$ 의 분포가 원점을 기준으로 대칭적인 원을 그리고 있으나, NiFe/IrMn과 IrMn/NiFe/IrMn 시료의 경우에는 왼쪽으로 치우쳐진 비대칭의 원을 나타낸다. 이는 교환 바이어스 효과에 의해  $H_r$ 이 이동된 것을 의미한다.

각도에 따른  $H_r$ 의 분포는 일축방향이방성과 일축이방성이 결합된 효과로 분석할 수 있다. 따라서 각도에 따른  $H_r$  분포를 교환 바이어스 세기에 해당하는 일축방향이방성 자기장 ( $H_{ex}$ )과 일축이방성 자기장( $H_k$ ) 변수를 포함하는 코사인 시리즈의 현상학적인 식으로 표현할 수 있다[15].

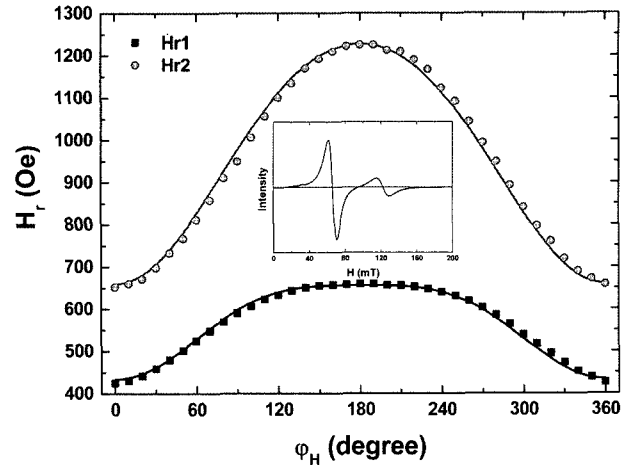
$$H_r(\phi_H) = H_{r0} - H_{ex} \cos \phi_H - H_k \cos 2\phi_H \quad (1)$$

위 식에서  $\phi_H$ 는 인가 자기장과 강자성층의 자화 용이축 사이의 각도를 나타낸다.  $H_{r0}$ 는 평균 공명 자기장으로 각도와 무관한 항이다. 위 식에서 두 번째 항은 강자성층과 반강자성층 사이의 교환결합에 관련된 항이며, 세 번째 항은 강자성층의 일축이방성에 관련된 항으로  $H_k = 2K_u/M_r$ 를 나타낸다. 여기서  $K_u$ 와  $M_r$ 는 각각 일축이방성과 강자성층의 포화자화값을 나타낸다. Fig. 2에서 실선은 식(1)을 이용하여 fitting한 결과를 나타낸다. 식(1)을 이용하여 구한  $H_{r0}$ ,  $H_{ex}$  그리고  $H_k$  값은 Table I에 나타나 있다. Table I에서 보면, 교환 바이어스된 NiFe/IrMn 및 IrMn/NiFe/IrMn 박막들의  $H_{ex}$ 는 200 Oe 이상의 큰 값을 나타내었다. IrMn/NiFe/IrMn의 경우 강자성층 위·아래 반강자성층이 위치하여 위·아래 두 계면의 효과로 인하여 NiFe/IrMn 박막보다 큰  $H_{ex}$ 를 나타낼 것으로 예상하였으나 그렇지 못하였다. 이는 IrMn층이 아래에 있는 경우 구조적 배향이 NiFe/IrMn 보다 좋지 않기 때문으로 인한 계면 상태로 설명할 수 있다. 한편,  $H_k$ 의 값은 교환 바이어스된 박막의 경우 단일 NiFe 박막에 비하여 매우 큰 값을 나타낸다. 이는 강자성층의 일축이방성이 반강자성층과의 교환 결합에 의해 증대됨을 나타낸다. 즉, 일축방향이방성과 비례함을 의미한다.

Fig. 3은 NiFe/IrMn/CoFe 박막의  $H_r$ 의 각도 의존성 결과를 나타낸다. 이 경우 Fig. 3의 삽입 그림과 같이 공명 흡수를 나타낸다.

**Table I.** The average resonance field  $H_{r0}$ , unidirectional exchange anisotropy field  $H_{ex}$ , the uniaxial anisotropy field  $H_k$ , and the mean peak-to-peak linewidth  $\Delta H$  which were obtained from eq. (1).

Sample	$H_{r0}$ (Oe)	$H_{ex}$ (Oe)	$H_k$ (Oe)	$\Delta H$ (Oe)
NiFe	980	-	4.1	40.9
NiFe/IrMn	955	301.0	17.5	139.5
IrMn/NiFe/IrMn	842	218.0	25.4	238.0
NiFe/Cu 0.8/IrMn	992	7.7	4.3	48.2
NiFe/Cu 1.8/IrMn	999	0.7	3.8	46.5
NiFe/IrMn/CoFe $H_{r1}$	572	111	26.1	93.5
$H_{r2}$	961	284	17.1	131.5



**Fig. 3.** Angular dependence of resonance field of NiFe/IrMn/CoFe thin film. The inserted figure indicate the resonance absorption data at  $\phi_H = 0$ .

선은 두 개로 나타나는데, 이는 IrMn 반강자성층 위·아래에 있는 강자성 NiFe층과 CoFe층의 다른 포화자화값 때문에 나타난다. 또한 교환 바이어스 결합은 강자성층과 반강자성층 사이의 계면 결합으로부터 나타나기 때문에  $H_r$ 의 분포가 서로 다른 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 큰 자기장에서 나타난  $H_r$  분포는 NiFe/IrMn의 경우와 비교하여 유사한 분포를 나타내므로 NiFe 강자성층과의 결합에 의해 나타남을 알 수 있고, 작은 자기장에서 나타난  $H_r$  분포는 CoFe층과의 결합에 의한 임을 알 수 있다.

강자성과 반강자성층 사이의 교환 바이어스는 강자성층과 반강자성층의 두께 및 종류에 따라 그 세기가 조절 가능한데, 최근 강자성층과 반강자성층 사이에 비자성 스페이서층(Cu, Ag, Ru, Au 등)을 삽입하여 교환 바이어스 세기를 조절하는 연구가 있었다[16, 17]. 이에 따르면, 스페이서층의 두께에 따라 교환 바이어스의 세기는 감소함을 나타내었다. 그러나 Gökemeijer[16]는 감소가 단조롭게 이루어진다고 보고한 반면, Mewes[17]는 진동하면서 감소한다고 보고하였다. 스페이서층의 삽입에 따른 교환 바이어스 효과는 논란의 여지가 남아 있지만, 공통적인 결과로는 교환 바이어스 효과가 스페이서층을 통하여 장거리 질서를 가지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 스페이서층의 삽입에 대한 효과를 조사하기 위하여 NiFe/IrMn층 사이에 Cu 스페이서층을 삽입하였다. Fig. 4는 NiFe/Cu(t)/IrMn 박막의 각도에 따른  $H_r$  분포를 나타낸다. Cu층이 삽입된 박막의  $H_r$  분포는 Cu층이 없는 NiFe/IrMn과는 매우 다른 거동을 나타낸다. 즉, 약한 교환 결합으로 인해 약한 일축방향성 거동을 나타내었다. Cu층이 1.8 nm인 경우 0.8 nm인 경우와 비교하여  $H_r$  분포는 NiFe 단일 박막의 거동과 유사함을 나타내었다. Table I에서

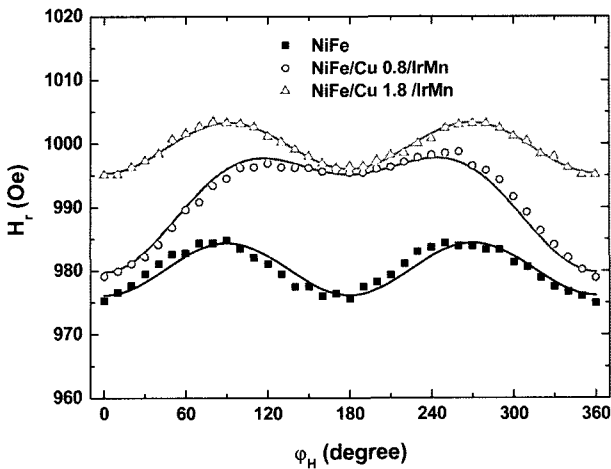


Fig. 4. Angular dependence of resonance field of NiFe/Cu(t)/IrMn ( $t=0.8, 1.8$  nm) thin films. Data of an unbiased single NiFe thin film was inserted to comparison.

보면 Cu 1.8 nm인 경우  $H_{ex}$ 는 매우 작아졌으나 Cu층을 통해 교환 결합이 유지됨을 나타낸다. 주목할만한 것은  $H_k$  값의 경우 NiFe 단일 박막의 값과 거의 유사한 값을 나타내는데 이는 약한 교환 결합으로 인하여 NiFe 강자성층이 단일 NiFe와 유사한 특성을 가짐을 알 수 있다.

교환 바이어스된 강자성층의 공명 자기장은 단일 강자성층의 값보다 작은 값으로 이동하는 것으로 알려져 있다. McMichael은 이는 반강자성층내 자구들의 비가역 거동에 의한 회전 이방성(rotatable anisotropy) 때문이라고 보고하였다 [18]. 즉, 강자성층 근처 계면에 있는 반강자성층내 자구들의 크기 분포로 인하여 강자성층의 자화 반전에 영향을 미치는 pinning 자기장을 유도함을 의미한다. 따라서 반강자성층내 자구들의 거동에 영향을 미치는 요소로는 외부 온도, 반강자성층 두께 외에 반강자성 계면에 인접한 층의 구조적 상태등을 들 수 있다. 본 연구에서는 Table I에서 볼 수 있듯이 각 시료에 대한 평균 공명자기장  $H_0$ 는 NiFe/IrMn, NiFe/IrMn/CoFe와 같이  $H_{ex}$ 가 큰 경우 작은 값을 나타내어 IrMn층내 자구들의 회전 이방성에 의해 설명되어질 수 있다. 그러나 Cu층이 삽입된 시료의 경우에는 단일 NiFe 박막의 값과 비슷한 크기의 값을 나타내었는데, 이는 반강자성층과 강자성층이 직접 계면을 형성하지 않기 때문에 회전이방성 효과가 생기지 않았기 때문으로 설명할 수 있다. 즉, 이때의  $H_0$  값은 NiFe층과 인접한 Cu층에 의해 생긴 표면 이방성 효과가 우세하게 작용하였다고 생각할 수 있다.

강자성 공명 측정에서 공명 자기장 분포 외에 얻을 수 있는 값으로 공명 흡수선의 선평  $\Delta H$ 가 있다. 선평의 변화는 보통 강자성층의 내적 고유 특성으로부터 오는데, 이방성, 구조적 결합, 측정 주파수 그리고 불균일한 결합등과 같은 경

우에 나타난다[14]. 보통 교환 바이어스된 박막은 단일 박막과 비교하여 큰 선평을 나타낸다[13]. Speriosu는 이러한 현상은 강자성층의 국소 pinning에서 오는데 이는 Malozemoff 모델에 기초하여 불균일한 표면 이방성 때문에 생긴다고 보고하였다[19]. 따라서 결국, 선평의 넓어짐은 교환 바이어스 세기에 비례하여 변한다. Table I에서 보면 각 시료들의  $\Delta H$  값은  $H_{ex}$  값의 크기에 비례하여 변하는 것을 볼 수 있다.

### III. 결 론

본 실험에서는 NiFe 및 CoFe를 강자성층으로 하고 IrMn을 반강자성층으로 하는 다양한 층구조의 박막들에 대한 교환 바이어스 효과를 강자성 공명 실험을 통하여 분석하였다. 공명자기장의 각도의존성 실험을 통하여 일축방향이방성 및 일축이방성을 구하였다. NiFe/IrMn, IrMn/NiFe/IrMn 박막들의 경우 큰 교환 바이어스로 인하여 공명자기장 분포는 일축방향 거동을 나타내었으며, Cu층이 삽입된 NiFe/Cu/IrMn 박막들은 NiFe 단일 박막과 유사한 거동을 나타내었다. 또한 NiFe/CoFe/CoFe 박막은 다른 강자성층으로 인하여 두 개의 공명 자기장 분포를 나타내었다.

### 참고문헌

- [1] J. C. S. Kools, IEEE Trans. Magn., **32**(4), 3165(1996).
- [2] G. W. Anderson, M. Pakala, and Y. Huai, IEEE Trans. Magn., **36**(5), 2605(2000).
- [3] G. W. Anderson, Y. Huai, and M. Pakala, J. Appl. Phys., **87**(9), 5726(2000).
- [4] A. E. Berkowitz and K. Takano, J. Magn. & Mag. Mat., **299**, 552(1999).
- [5] J. Nogues and I. K. Schuller, J. Magn. & Mag. Mat., **192**, 203(1999).
- [6] W. H. Meklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev., **105**, 904(1957).
- [7] D. Mauri, H. C. Siegmann, P. S. Bagus, and E. Kay, J. Appl. Phys., **62**, 3047(1987).
- [8] A. P. Malozemoff, Phys. Rev. B, **35**, 3679(1987); J. Appl. Phys., **63**, 3874(1988); Phys. Rev. B, **37**, 7673(1988).
- [9] M. D. Stiles and R. D. McMichael, Phys. Rev. B, **59**(5), 3722(1999).
- [10] M. Kiwi, J. Magn. & Mag. Mat., **234**, 584(2001).
- [11] H. Xi and R. M. White, Phys. Rev. B, **60**, 14837(1999).
- [12] V. I. Nikitenko, V. S. Gornakov, L. M. Dedukh, Yu. P. Kabanov, A. F. Khapikov, A. J. Shapiro, R. D. Shull, A. Chaiken, and R. P. Michel, Phys. Rev. B, **57**, R8111(1998).
- [13] H. Xi, K. R. Mountfield, and R. M. White, J. Appl. Phys., **87**, 4367(2000).
- [14] J. Lindner and K. Baberschke, J. Phys.: Condens. Matter, **15**, R193(2003).

- [15] M. Rubinstein, P. Lubitz, and S. F. Cheng, *J. Magn. Mater.*, **195**, 299(1999).
- [16] N. J. Gökemeijer, T. Ambrose, and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 4270(1997); *J. Appl. Phys.*, **81**, 4999(1997).
- [17] T. Mewes, B. F. P. Roos, S. O. Demokritov, and B. Hillebrands, *J. Appl. Phys.*, **87**, 5064(2000).
- [18] R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen, and W. F. Egelhoff, *Phys. Rev. B*, **58**, 8605(1998).
- [19] V. S. Speriosu and S. S. P. Parkin, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 2999(1987).

## Exchange Bias Study by FMR Measurement

Yong-Goo Yoo\*

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea*

Nam-Seok Park

*Department of Electrical and Electronic engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea*

Seong-Gi Min and Seong-Cho Yu

*Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 360-763, Korea*

(Received 30 September 2005, in final form 18 October 2005)

Exchange bias effect of a various layered thin films were studied by FMR measurement. In plane angular dependence of a resonance field distribution which measured by FMR was analysed as a combined effect of an unidirectional anisotropy and an uniaxial anisotropy. Exchange biased NiFe/IrMn, IrMn/NiFe/IrMn, and NiFe/IrMn/CoFe thin films showed larger unidirectional anisotropy field and uniaxial anisotropy field with compared to that of an unbiased NiFe single thin film. In case of NiFe/Cu/IrMn, the film with thick Cu layer exhibited a similar trend to the unbiased NiFe thin film. NiFe/IrMn/CoFe thin film showed two resonance field distribution due to different ferromagnetic layers. In addition to the resonance field, the line width was also analysed with related to exchange bias effect.

**Key words** : exchange bias, ferromagnetic resonance, unidirectional anisotropy field and uniaxial anisotropy