

## NiFe/FeMn 이중박막의 증착시 자기장에 의한 교환결합력 이방성 효과

박영석

상지대학교 대학원 동서의료공학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702

황도근

상지대학교 이공과대학 응용물리전자학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702

이상석\*

상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702

(2008년 8월 19일 받음, 2008년 9월 29일 최종수정본 받음, 2008년 9월 29일 게재확정)

이온빔 증착법으로 제작한 코닝유리(Corning glass)/Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/FeMn(25 nm)/Ta(5 nm) 다층박막 구조에서 반강자성체 FeMn층 증착시 인가한 일축 이방성 자기장 방향에 따른 강자성체 NiFe층의 자화 스핀배열 의존성을 조사하였다. NiFe층과 FeMn층 증착시 인가한 자기장 방향을 달리한 각도는 각각 0°, 45°, 90°였다. 용이축 MR(magnetoresistance) 곡선으로부터 얻은 교환결합세기( $H_{ex}$ )는 증착 자기장 각도가 45°일 때 40 Oe로, 90°일 때는 거의 0 Oe로 감소하였다. 반면에 곤란축 MR 곡선으로부터 얻은  $H_{ex}$  값은 증착 자기장 각도가 45°일 때 35 Oe로, 90°일 때는 79 Oe로 증가하였다. 강자성체 층의 용이축과 반강자성체 층의 일축 이방성 방향이 90° 차이가 나는 계면에서도 FeMn층이 NiFe층의 자기모멘트 스핀방향을 회전시켜 교환결합 이방성 효과가 발생함을 알 수 있었다.

**주제어** : 교환결합력, NiFe/FeMn 이중박막, 일방향 증착 자기장, 증착각도

### I. 서 론

거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve ; GMR-SV) 박막을 이용한 두 가지의 대표적인 검출용 나노소자로서 고밀도 자기기록에 대한 읽기 출력헤드와 디옥시리보핵산(deoxyribonucleic acid; DNA) 칩(chip)에 핵심소자인 바이오-마커(bio-marker)가 각광을 받고 온지 오래이다[1-3]. GMR-SV 나노소자 구조는 반강자성체로 Mn합금 계열 박막인 IrMn, FeMn, PtMn, NiMn 박막과 강자성체 NiFe, CoFe 박막 비자성체 Cu 박막으로 이루어진다. 국내·외 유수의 자성체 그룹들에 의해 반강자성체 FeMn 혹은 IrMn과 이웃층 강자성체 NiFe 혹은 CoFe 박막 계면에서 발생하는 교환결합력(exchange bias coupling field;  $H_{ex}$ ) 메커니즘(mechanism)의 근본 원인을 완전히 밝히는 연구가 진행되어 왔다[4-6]. GMR-SV 나노소자의 전형적인 형태로서 반강자성층과 이웃해 있는 강자성체가 충분히 큰 교환결합력을 얻고자 상부층 구조의 반강자성층을 형성하게 된다. 이것은 교환결합력 생성에 가장 중요한 요인인  $\gamma$ -FeMn (111) 결정성장을 돕게 된다[7, 8].

현재의 연구 결과로 NiFe/FeMn 이중박막 교환결합력의 미

시적인 근원은 몇 가지 모델이 제시되어 실험적으로 증명되어 왔다. 그 중 미시적인 표면거칠기 때문에 발생한 (111) 결정구조 격자 내에서 스핀 방향이 서로 보상되지 않은 두 개 층은 원자 스핀 존재와 계면에서 반강자성체 원자들의 극소량 희석 및 오렌지 결합력(orange coupling field) 존재로 설명이 가능하다[9-11]. 본 연구는, 강자성체와 반강자성체 사이 발생하는 교환결합력의 근원을 규명하는 실마리를 얻고자 하였다. Sub/Ta/NiFe/FeMn/Ta 다층구조에서 각 층을 증착할 때, 일축으로 인가한 자기장에 의존하는 NiFe/FeMn 이중박막의 교환결합력 이방성 효과에 대한 실험을 하였다. 특히 NiFe층의 일축 자기장 방향은 일정하게 유지하고, FeMn층 증착시 인가한 일축 자기장 방향을 변화하여 이미 형성된 강자성체의 이방성 자화력과 반강자성체 원자 스핀 배열의 변화 의존성을 고찰하였다.

### II. 실험 방법

Fig. 1(a)은 NiFe/FeMn 이중박막의 일반적인 형태로 교환결합층을 갖는 glass/Ta/NiFe/FeMn 다층구조를 도시한 것이다. 다층박막 구조의 시료들은 Corning #7059 glass 위에 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템을 이용하여 상온에서 증착하였다. 자세한 증착시스템 개요도는 Fig. 2에 나

\*Tel: (033) 730-0415, E-mail: ssllee@sangji.ac.kr

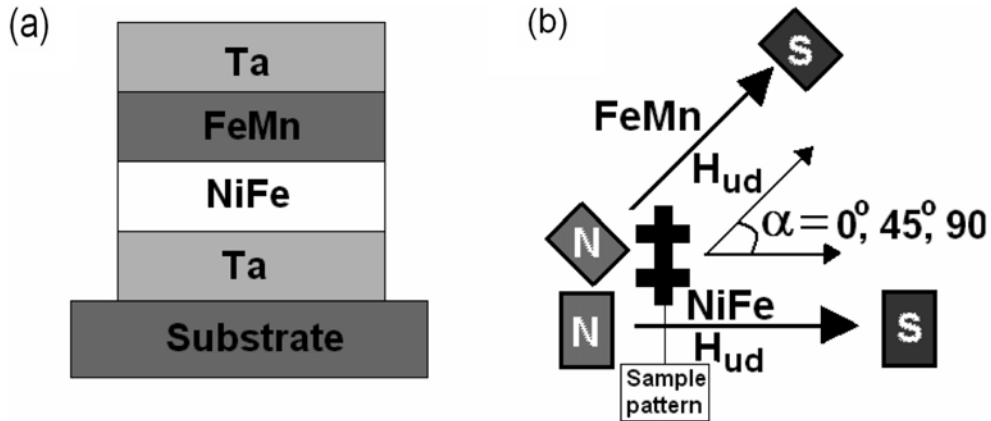


Fig. 1. Schematic configuration of (a) conventional type NiFe/FeMn bilayer and (b) three different anisotropy deposition angles of unidirectional field between FeMn and NiFe.

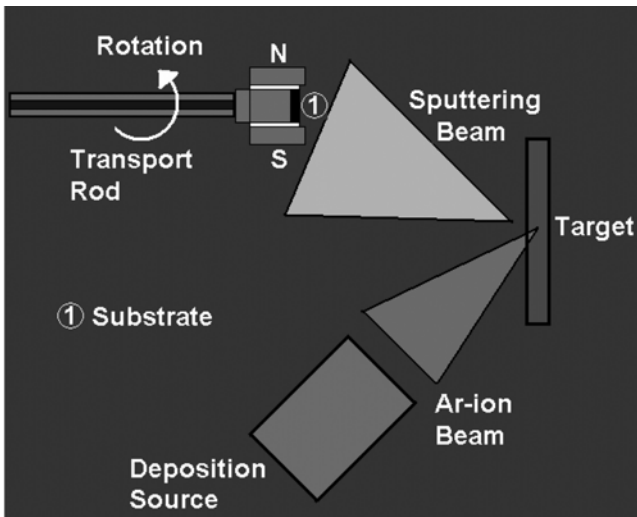


Fig. 2. Schematic of typical ion source, target, and substrate configuration suitable for rotating transport rod with an unidirectional deposition magnetic field application to NiFe/FeMn bilayer.

타내었다. 6개의 3-인치 타겟이 장착된 초고진공(ultra-high vacuum; UHV) 이온빔 시스템은 기본 진공도가  $1 \times 10^{-8}$  Torr 이었다[12]. 사용한 이온 건은 직경 3 cm 탄소판 그리드(grid)를 갖는 카프만 소스(Kaufmann source) 이었다. 이온빔 생성에 필요한 아르곤 가스 분압은 0.2 mTorr로 하였고, 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온빔 전압 및 전류값을 각각 120 V, 30 V, 800 V, 6.0 mA로 정하였다. 이 조건에서 Ta, NiFe, FeMn 층들의 증착율은 각각 0.020 nm/s, 0.013 nm/s, 0.15 nm/s 이었다. 증착된 각각의 Ta, NiFe, FeMn 단일박막을 EDS(energy dispersive spectrum)로 분석한 결과 불순물은 발견되지 않았고, 박막과 타겟의 원자성분비 차이가 2% 이내로 거의 일치하였다. AFM(atomic force microscopy)으로 분석한 박막의

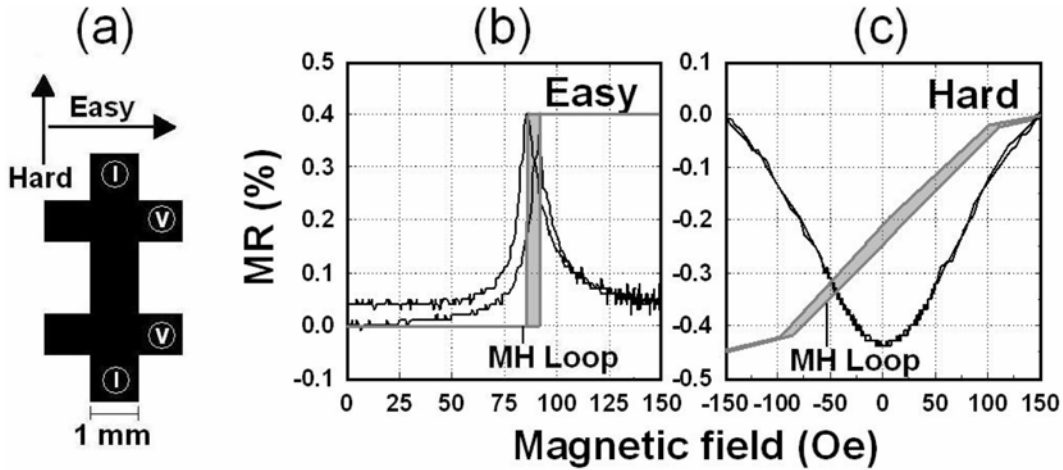
표면거칠기는 0.1 nm 이내로 양호하였다. 상온에서 증착한 모든 자성체 시료는 증착시 자기장 350 Oe 크기를 갖는 영구자석을 이용하여 일축 이방성을 유도하였다.

Fig. 1(b)은 Sub/Ta/NiFe/FeMn/Ta 다층박막 구조에서 FeMn의 자기이방성에 따른 교환결합력 특성을 관찰하기 위해 NiFe층과 FeMn층 증착시 인가한 일방향 증착자기장(unidirectional deposition field;  $H_{ud}$ ) 각도( $\alpha$ )를 도기한 것이다. 여기서 증착각도  $\alpha$ 는  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 이었다. 특히 NiFe층의 일축 자기장 방향을 일정하게 유지하고 FeMn층 증착시 인가한 일축 자기장 방향을 변화하여 실제로 이미 형성된 강자성체 이방성 자화력과 반강자성체 FeMn 원자 스핀배열 변화 의존성을 고찰하였다. 박막 시료가 제작되는 공간 내에 균일한 자기장 350 Oe 값을 유지하도록 영구자석을 고정한 후 시료 전송대를 고진공 상태에서 Fig. 2와 같이 회전시켜 FeMn층 증착시 각도를 다르게 하여 다층박막을 제작하였다.

800 eV 에너지를 갖는 알곤-이온(Ar-ion) 빔(beam)이 표적에 입사되고 타겟 원자가 스퍼터링 빔으로 형성되어 기판에 증착 되는 모양을 Fig. 2에 도시하였다. 제작된 박막 두께와 자기이력(magnetic hysteresis; MH) 곡선, 결정성은 각각 알파 스테퍼( $\alpha$ -stepper)와 VSM(vibrating sample magnetometer), XRD(X-ray diffractometer)를 사용해  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  영역의 증착 범위 내에서 균일함을 확인하였다. 모든 박막 시료는 더 이상의 이방성 유도를 위해 진공 후 열처리는 하지 않았다. 교환결합세기( $H_{ex}$ )와 보자력(coercivity  $H_c$ )은 모두 4-단자 자기저항 측정 시스템으로 얻은 AMR(anisotropy magnetoresistance) 곡선으로부터 결정하였다.

### III. 실험결과 및 논의

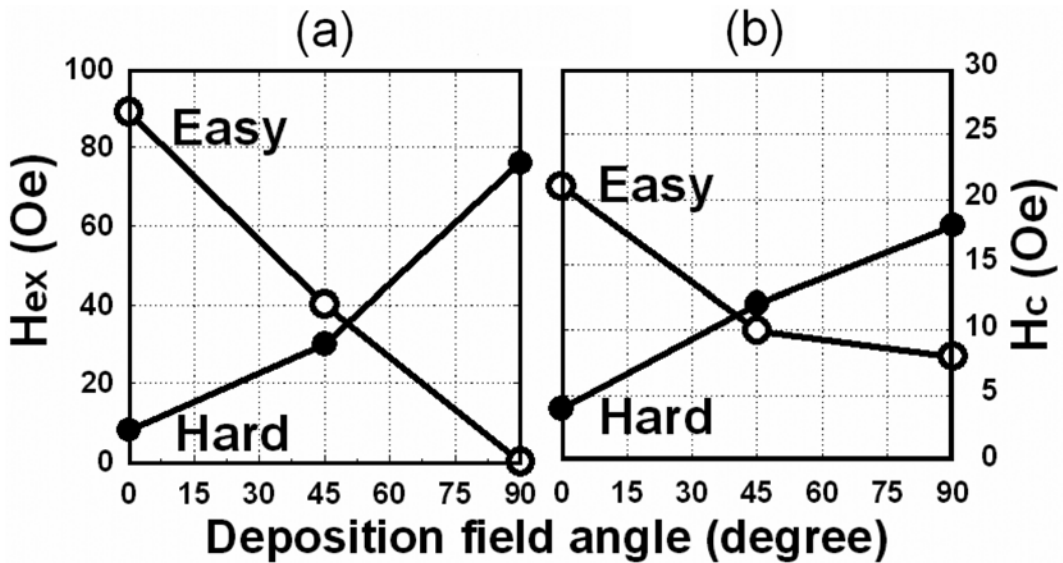
강자성체와 반강자성체 사이에 발생하는 교환결합력으로 인



**Fig. 3.** (a) Schematic of the sample with 4-probe electrodes prepared by using shadow mask during deposition of NiFe/FeMn bilayer. MH loops and definitions of exchange bias coupling field and coercivity from the (b) easy and (c) hard MR loops of NiFe/FeMn bilayer.

해 NiFe 자화방향을 FeMn의 스핀 자화방향으로 유도할 수 있다. Fig. 3(a)에 도시한 1 mm 폭의 4-단자와 전류 흐름에 의한 AMR 효과가 자기저항곡선으로 나타나게 된다. 증착시 그림자 마스크를 이용한 박막시료는 전류 방향이 용이축과 수직이 되게 설정하였다. Fig. 3(b)는 glass/Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/FeMn(25 nm)/Ta(5 nm) 박막에 외부 자기장을 인가하여 용이축 방향으로 측정된 일반적인 AMR 곡선이다. 외부자기장이 음에서 출발하여 양으로 넘어간 후, AMR 최대값은 +96 Oe에서 나타났다. 다시 되돌아오는 외부자기장 양에서 최대값이 +83 Oe에서 나타났다. 따라서, AMR 곡선과 대응하는 MH 곡선을 비교할 때,  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는  $\{(96 \text{ Oe}) + (82 \text{ Oe})\} / 2 = 89 \text{ Oe}$ 와  $\{(96 \text{ Oe}) - (82 \text{ Oe})\} / 2 = 4 \text{ Oe}$ 로 각각 결정되었다.

한편, Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)에서 보인 곤란축 방향으로 외부 자기장을 인가하여 측정된 glass/Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/FeMn(25 nm)/Ta(5 nm) 박막의 일반적인 AMR 곡선이다. 곤란축의 AMR 곡선에 대응한 MH 곡선으로부터  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 는 8 Oe와 12 Oe로 나타났다. 이온빔 증착법은 스퍼터링 증착법과 달리 이온빔 타겟에 입사하는 각도로 인해 타겟에서 떨어져 나온 증착 원자들이나 이온들이 기판에 경사진 각도로 증착됨으로서 박막의 결정성장에 큰 영향을 준다. NiFe/FeMn 이중박막에 대한 버퍼층 Ta층 두께가 0 nm에서 40 nm까지 변할 때 XRD로 측정된 결정성을 조사하였다[7].  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 의 의존성은 Ta이 증가함에 따라 NiFe(111)/ $\gamma$ -FeMn(111) 결정성이 우수해져 5 nm부터는  $H_{ex}$ 의 값이 거의 90 Oe 일정한 값을 유



**Fig. 4.** (a) Exchange bias coupling fields  $H_{ex}$  and (b) coercivities  $H_c$  for easy and hard axes of NiFe/FeMn bilayer as a function of anisotropy deposition field angles of unidirectional field between FeMn and NiFe.

지하였다. 또한 이중박막에서 형성된 결정 낱알입자(grain)들의 크기가 수  $\mu\text{m}$  단위로 이루어져 있음을 MFM(magnetic force microscopy)로 확인하였다[6]. 등방적으로 성장한 결정 구조와 더불어 비교적 작은 크기의 결정 낱알입자들이 교환 결합세기를 상대적으로 향상한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 반강자성체 FeMn층의 자기장 인가시 증착각도를 달리함으로써, 계면에서 발생하는 교환결합세기의 발생 원인을 규명하기 위한 기본적인 실험결과를 제시하였다.

Fig. 4(a)는 NiFe/FeMn 이중박막에서 NiFe층과 FeMn층에 각각 인가한 자기장 방향 각도에 따라 측정된 용이축과 곤란축 MR 곡선으로부터 얻은 교환결합세기의 변화를 나타낸 것이다. 증착 자기장 각도가  $45^\circ$ 일 때, Fig. 3(a)에서 도시한 용이축으로 측정된  $H_{ex}$  값이  $40\text{ Oe}$ 로,  $90^\circ$ 일 때는 거의  $0\text{ Oe}$ 로 급격히 감소하였다. Fig. 3(a)에서 도시한 곤란축으로 측정된 MR 곡선으로부터 얻은  $H_{ex}$  값은 증착 자기장 각도가  $0^\circ$ 일 때  $8\text{ Oe}$ 에서  $45^\circ$ 일 때는  $35\text{ Oe}$ 로,  $90^\circ$ 일 때는  $79\text{ Oe}$ 로 급격히 증가하였다. 이것은 용이축과 곤란축에서 측정된 MR 곡선이 완전히 바뀌었음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 NiFe/FeMn 이중박막에서 증착시 인가한 자기장 방향과의 각도에 따른  $H_c$  변화를 나타낸 것이다. 증착 자기장 각도가  $45^\circ$ 일 때, Fig. 3(a)에서 도시한 용이축으로 정한  $H_c$  값이  $10\text{ Oe}$ 로 감소하였고,  $90^\circ$ 일 때는 거의  $8\text{ Oe}$ 로 감소하였다. 또한 Fig. 3(a)에서 도시한 곤란축 MR 곡선으로부터 얻은  $H_c$  값은 증착 자기장 각도가  $0^\circ$ 일 때  $4\text{ Oe}$ 에서  $45^\circ$ 일 때  $12\text{ Oe}$ 로 증가하였고,  $90^\circ$ 일 때는  $18\text{ Oe}$ 로 증가하였다. 이것은  $H_{ex}$ 의 경우와 마찬가지로 용이축과 곤란축에서 측정된 MR 곡선이 완전히 바뀌었음을 알 수 있다. 일반적으로 자화특성을 이용한 GMR-SV에서 소자를 제작했을 경우, NiFe/FeMn 고정층의 곤란축을 패터닝된 모양에서 소자의 길이방향에  $90^\circ$ 로 정하고, 가로 폭 방향으로 진공열처리시 자기장을 인가한다. 이로써 고감도 자기저항 특성을 유도하는 진공열처리 방법을 이용하여 Cu층을 사잇층으로 한 NiFe 자유층은 길이방향으로 자화방향의 자유로운 변화를 줄 수 있게 된다[13]. 강자성체의 용이축과 곤란축은 존재하나 반강자성체가 강자성체의 자화특성에 따라 변하는 것보다 반강자성적 자화 특성에 의존하는 경향이 매우 강함을 추측할 수 있다. 이것은 반강자성체의 교환결합세기가 강자성체의 교환결합세기 보다 우세하여 층간에서 자유롭게 자화방향의 조절이 가능함을 보여 준다.

강자성체의 자화는 인가한 자기장의 크기에 의존한다. 자성체의 히스테리시스 곡선인 MH 곡선에서 알 수 있듯이 NiFe 층은 증착시 외부자기장에 의한 용이축 형성이 쉽게 되어보자력이 수 Oe 정도의 연자성 값을 갖는다. NiFe층과 계면을 형성하여 증착되는 FeMn층 두께가  $8\text{ nm}$  보다 클수록 Fig.

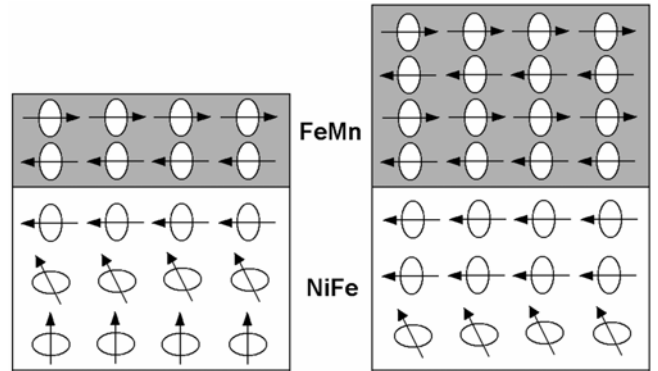


Fig. 5. Ferromagnetic and antiferromagnetic interfacial transition in NiFe/FeMn bilayer due to the increase of FeMn thickness. The arrows represent magnetic dipole moments.

5처럼 외부 자기장과 같은 일축방향으로 정렬된 반강자성체 자기 쌍극자 모멘트를 이룬다. 강자성체 NiFe층의 용이축이 FeMn층의 일축방향과  $90^\circ$  차이 인에도 불구하고, NiFe층의 자기모멘트 스핀방향을 회전시켜 계면에서 먼저 교환결합을 발생시킨다. 본 연구에서 FeMn층이 증착될 때 원자빔이 기판에 도달하여 기판에 인접한 영구자석의 자화 방향으로 정렬한다고 사료된다. 이러한 결과로부터 FeMn층의 증착 자기장 방향을 고정하고 NiFe층 증착시 자기장 방향을 다르게 했을지라도 교환결합력과 자기쌍극자 모멘트의 스핀방향은 인가된 자기장의 방향 보다는 이미 형성된 FeMn층의 자기모멘트 방향으로 회전 정렬 될 것으로 추측이 가능하다. 따라서 강자성체와 반강자성체의 계면에서 일어나는 교환결합의 원인 중 하나가 FeMn층의 일축 이방성 효과로 판단된다.

#### IV. 결 론

Sub/Ta/NiFe/FeMn/Ta 다층구조의 FeMn층의 자기이방성에 따른 교환결합력 특성을 관찰하기 위해 NiFe층과 FeMn층 증착시 인가한 일방향 증착자기장 각도를 달리하였다. 특히 NiFe층의 일축 자기장 방향은 일정하게 유지하고 FeMn층 증착시 인가한 일축 자기장의 방향을 변화하여 실제로 이미 형성된 강자성체 이방성 자화력과 반강자성체 원자 스핀배열 변화 의존성을 고찰하였다. NiFe층과 FeMn층의 증착시 인가한 자기장 방향의 각도에 따라 측정된 MR 곡선으로부터 얻은 교환결합세기의 변화는 증착 자기장 각도가  $45^\circ$ 일 때,  $H_{ex}$  값이  $40\text{ Oe}$ 로 감소하였고,  $90^\circ$ 일 때, 거의  $0\text{ Oe}$ 로 급격히 감소하였다. 반면에 곤란축으로 측정된  $H_{ex}$  값은 각도가  $45^\circ$ 와  $90^\circ$ 일 때,  $35\text{ Oe}$ 와  $79\text{ Oe}$ 로 각각 증가하였다. 강자성체 NiFe 층의 용이축이 FeMn층의 일축방향과  $90^\circ$  차이가 나지만 NiFe층의 자기모멘트 스핀방향을 회전시켜 계면에서 먼저 교

환결합을 발생시킨다. 강자성체와 반강자성체의 계면에서 일어나는 교환결합의 원인 중 하나가 FeMn층의 일축 이방성 효과로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구 결과는 2007년 과학기술국제화사업 (KICOS) 과제인 글로벌 파트너십 프로그램 (No. K20702000015-07E0200-01510)과 상지대학교 교내 연구과제 프로그램의 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

[1] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit, *J. Appl. Phys.*, **69**, 4774 (1991).

[2] K. Mizoguchi, S. Tanaka, T. Ogawa, N. Shiobara, and H. Sakamoto, *Phys. Rev. B*, **72**, 33106 (2005).

[3] D. R. Baselt, G. U. Lee, M. Natesan, S. W. Metzger, P. E. Sheehan, and R. J. Colton, *Biosens. Bioelectro.*, **13**, 731 (1998).

[4] B. Dieny, *Europhys. Lett.*, **17**, 1333 (1994).

[5] S. K. Kim, S. C. Shin, and K. Y. Kim, *J. Kor. Phys. Soc.*, **39**, 1060 (2001).

[6] J. K. Kim, S. W. Kim, K. A. Lee, S. S. Lee, and D. G. Hwang, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **12**(4), 143 (2002).

[7] B. K. Kim, J. H. Kim, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **12**(4), 132 (2002).

[8] S. Nakagawa, K. Nishimura, Y. Shimizu, and M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2970 (1999).

[9] J. Nogues and I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**, 203 (1999).

[10] K. Takano, R. H. Kodama, A. E. Berkowitz, W. Cao, and G. Thomas, *J. Appl. Phys.*, **83**, 6888 (1998).

[11] A. E. Berkowitz and K. Takano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **202**, 552 (1999).

[12] B. K. Kim, J. Y. Lee, S. H. Ham, S. S. Lee, and D. G. Hwang, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **13**(2), 53 (2002).

[13] S. S. Lee, S. H. Park, K. S. Soh, H. W. Joo, G. W. Kim, and D. G. Hwang, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **17**(4), 172 (2007).

## Anisotropy Effect of Exchange Bias Coupling by Unidirectional Deposition Field of NiFe/FeMn Bilayer

Young-Seok Park

*Dept. of Western-Oriental Biomedical Engineering, Graduation, Sangji University, Gangwon-do 220-702, Korea*

Do-Guwn Hwang

*Dept. of Applied Physics and Electronics, College of Science & Engineering Science, Sangji University, Gangwon-do 220-702, Korea*

Sang-Suk Lee\*

*Dept. of Oriental Biomedical Engineering, College of Health Science, Sangji University, Gangwon-do 220-702, Korea*

(Received 19 August 2008, Received in final form 29 September 2008, Accepted 29 September 2008)

The relation of ferromagnet anisotropic magnetization and the antiferromagnet atomic spin configuration has been investigated for variously angles of unidirectional deposition magnetic field of FeMn layer in Corning glas/Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/FeMn(25 nm)/Ta(5 nm) multilayer prepared by ion beam deposition. Three unidirectional deposition angles of FeMn layer are 0°, 45°, and 90°, respectively. The exchange bias field ( $H_{ex}$ ) obtained from the measuring easy axis MR loop was decreased to 40 Oe in deposition angle of 45°, and to 0 Oe in the angle of 90°. One other side hand,  $H_{ex}$  obtained from the measuring hard axis MR loop was increased to 35 Oe in deposition angle of 45°, and to 79 Oe in the angle of 90°. Although the difference of unidirectional axis between ferromagnet NiFe and antiferromagnet FeMn was 90°, the strong antiferromagnetic dipole moment of FeMn caused to rotate the weak ferromagnetic dipole moment of NiFe in the interface. This result implies that one of origins for exchange coupling mechanism depends on the effect of magnetic field angle during deposition of antiferromagnet FeMn layer.

**Keywords** : exchange bias coupling, NiFe/FeMn bilayer, unidirectional deposition field, sample deposition angle