

## 퍼멀로이와 코네틱 박막의 연자성 특성 비교

최종구<sup>1</sup> · 황도근<sup>1,2</sup> · 이상석<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 대학원 동서의료공학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702  
<sup>2</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원도 원주시 우산동 220-702

### 이장로

<sup>3</sup>숙명여자대학교 자연과학대학 물리학과, 서울시 용산구 140-742

(2009년 7월 13일 받음, 2009년 8월 21일 최종수정본 받음, 2009년 8월 21일 게재확정)

이온빔 증착법으로 제작한 코닝유리(Corning glass)/Ta(5 nm)/(Permalloy, Conetic)/Ta(5 nm) 박막에 대한 연자성의 특성에 대해 연구하였다. 퍼멀로이(Permalloy; NiFe)층과 코네틱(Conetic; NiFeCuMo)층을 증착하여 인가 자기장 방향에 용이축과 곤란축의 자기저항곡선으로부터 얻은 보자력과 포화자기장에 대해 각각 비교하였다. 두께가 10~15 nm인 코네틱 박막의 표면저항값은 퍼멀로이 박막보다 2배 정도 높았으나 보자력과 포화자기장은 1/3배 정도 낮았으며, 자화율은 2~3배 정도 높은 초연자성의 특성을 가졌다. 퍼멀로이 박막보다 연자성의 특성이 높은 코네틱 박막을 이용한 스핀밸브나 터널접합의 소자를 개발할 수 있는 가능성을 확인하였다.

**주제어** : 이온빔 증착법, 퍼멀로이 박막, 코네틱 박막, 보자력, 연자성, 자화율

## I. 서 론

생체 자기분야의 저주파수 대역에서 1  $\mu$ G 이하의 미세 자기장 측정용 센서들은 초전도체 박막을 이용한 SQUID (Superconducting QUantum Interface Device)나 지속게이트(flux gate)로 주로 사용되고 있다[1-3]. 이러한 소자들은 구동 시스템의 부피가 크고 고가이어서 보급형으로 활용할 수가 없는 단점을 가지고 있다. 바이오 센서로 활용 가능한 작고 저렴한 1  $\mu$ G 이하의 미세 자기장 측정용 센서를 사용하기 위해 박막소자의 개발이 필수적으로 대두되고 있는 현실에서 기존의 퍼멀로이 박막보다 높은 연자성의 특성을 가진 박막소자에 대한 개발이 시급하다[4-6].

전자석 변압기 내에 높은 주파수 효율을 나타내는 기존의 연자성 벌크 재료의 경우, 용이축에서 약 100 mG 정도의 보자력과 곤란축에서 약 10<sup>5</sup>의 자화율을 가지고 있다. 연자성 박막일 경우에는 보자력은 벌크보다 수 배~수십 배로 커지지만 자화율은 작아지는 특성을 가지게 된다[1, 7].

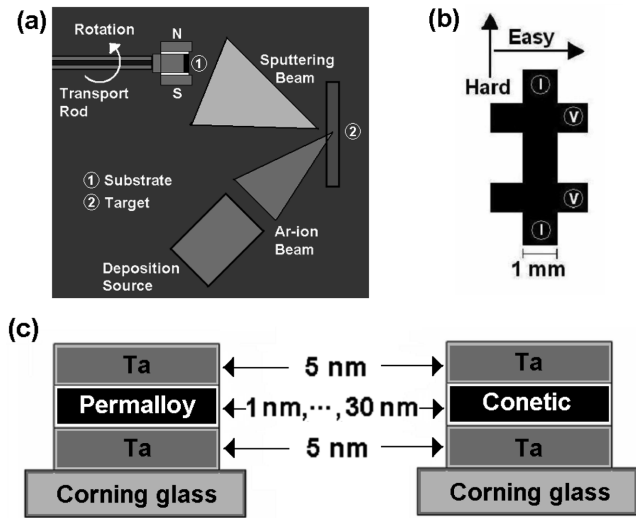
본 연구에서는 새로운 연자성 박막에 대한 자기적 특성을 개발하기 위해 코네틱(Conetic) 단층박막을 이온빔 스퍼터링 방법으로 증착하여 퍼멀로이(Permalloy) 단층박막의 보자력과 포화자기장 및 자화율을 비교하였다. 자기적 특성은 두께에 따른 4-단자의 표면저항값과 특정한 두께에서의 이방성 자기

저항곡선으로 조사하였다.

## II. 실험 방법

박막의 모든 시료들은 Corning #7059 glass 위에 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템을 이용하여 상온에서 증착하였다. 자세한 증착 시스템 개요도는 Fig. 1과 같다. 6개의 3-인치 타겟이 장착된 초고진공(Ultra-High Vacuum; UHV) 이온빔 시스템은 기본 진공도가  $1 \times 10^{-8}$  Torr이며, 사용한 이온 건은 직경 3 cm 탄소관 그리드(grid)를 갖는 카프만 소스(Kaufmann source)이다[8,9]. 이온빔 생성에 필요한 아르곤 가스 분압은 0.2 mTorr이며, 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속 전압, 양극(anode)의 방전 전압, 이온빔 전압 및 전류값은 각각 120 V, 30 V, 800 V, 6.0 mA이다. Fig. 1(a)와 같이 800 eV 에너지를 갖는 아르곤-이온(Ar-ion) 빔 (beam)이 표적에 입사되고 Ta, NiFe, Conetic 타겟 원자가 스퍼터링 빔으로 형성되어 기판에 증착된다. 위의 증착 조건에서 Ta, NiFe, Conetic의 증착율은 각각 0.020 nm/s, 0.013 nm/s, 0.013 nm/s 이다. 사용된 3인치 직경 3 mm 두께 원판형 퍼멀로이와 코네틱 타겟은 4 N 순도를 가지고 있으며, 원자 성분비는 각각 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>, Ni<sub>77</sub>Fe<sub>14</sub>Cu<sub>3</sub>Mo<sub>4</sub> 이다. 증착된 Ta, NiFe, Conetic 단일박막을 EDS(Energy Dispersive Spectrum)로 분석한 결과, 불순물은 발견되지 않았고 박막과 타겟의 원자 성분비는 2% 이내로 거의 일치하였다. AFM(Atomic

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



**Fig. 1.** (a) Schematic showing typical ion source, target, and substrate configuration inside ion beam deposition (IBD) system for fabricating the Corning glass(7059)/Ta/permalloy(or conetic)/Ta structure. (b) Schematic of the sample with 4-probe electrodes prepared by using shadow mask during deposition of multilayer. Here, arrows are noticed easy and hard axis, respectively. (c) Schematic configuration of conventional type with NiFe, NiFeCuMo single layer.

Force Microscopy)으로 분석한 Corning glass(7059)/Ta(5 nm)/NiFe(5~10 nm) 박막의 표면 거칠기가 0.5~0.1 nm로 측정되었다, 상온에서 증착한 모든 자성체의 시료는 증착시 자기장 350 Oe 크기를 갖는 영구자석을 이용하여 일축 이방성을 유도하였다.

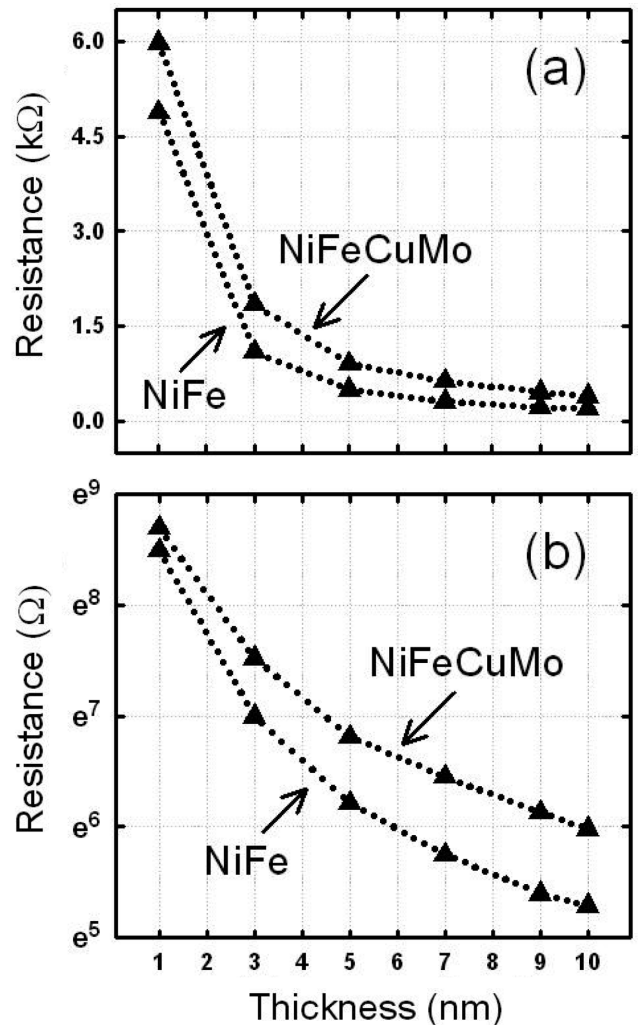
Fig. 1(b)는 Ta/NiFe, NiFeCuMo/FeMn/Ta 박막구조에서 자기이방성에 따른 교환결합력 특성을 관찰하기 위해 NiFe층과 NiFeCuMo층을 증착한 1 mm의 폭을 가진 2개 십자형의 그림자 마스크와 인가한 일방향 증착자기장에 대한 각도  $\alpha$ 가 0°, 90° 일 때의 용이축과 곤란축을 결정한 그림이다. 4단자를 측정할 때 필요한 전류와 전압을 표시하였다. 버퍼 역할을 하는 바닥층과 보호층인 Ta의 두께는 5 nm로 최적화하였으며, NiFe층과 NiFeCuMo층의 두께에 따른 연자성의 특성에 대한 의존성을 고찰하기 위해 1 nm에서 30 nm의 두께로 각각 시료를 제작하여 자기저항특성을 관찰하였다.

제작된 박막의 두께와 자기이력(Magnetic Hysteresis; MH) 곡선 및 결정성은 각각 알파 스텝퍼( $\alpha$ -stepper)와 시료진동형 자계측정기(Vibrating Sample Magnetometer; VSM), X-선 회절기(X-Ray Diffractometer; XRD)를 사용하여 조사하였으며,  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  영역의 증착 범위 내에서 균일함을 확인하였다. 모든 박막의 시료는 더 이상의 이방성 유도를 위해 진공 후 열처리하는 하지 않았다. 용이축의 보자력(Coercivity;  $H_{EC}$ )과 자화율(Susceptibility;  $\chi$ )은 4-단자 자기저항측정시스템으로 얻은 용이축과 곤란축의 자기이방성(anisotropy magne-

toresistance; AMR) 곡선으로 각각 결정하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

주로 약한 자계에서 사용되는 연자성 퍼멀로이 벌크의 경우, Ni 성분비가 78%에서 100%로 변할 때까지 자화율이 높은 것이 특징이지만 포화자속밀도  $B_s$ 는 1.2 T에서 0.8 T로 감소하며, 비저항  $\rho$ 는  $14 \mu\Omega\text{cm}$ 에서  $6.0 \mu\Omega\text{cm}$ 로 감소한다 [10]. 이는 체적 고유저항률인 비저항이 상온에서  $6.0 \mu\Omega\text{cm}$ 인 Ni이  $8.7 \mu\Omega\text{cm}$ 인 Fe보다 합금 원소함량이 증가하였기 때문이다[10, 11]. 코네틱 벌크인  $\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{14}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$ 는 고유저항률이 상온에서  $5.0 \mu\Omega\text{cm}$ 인 Mo와  $1.5 \mu\Omega\text{cm}$ 인 Cu 원소함량이 증가하여 저항률이 감소할 것으로 예상되지만 실제로 2원소

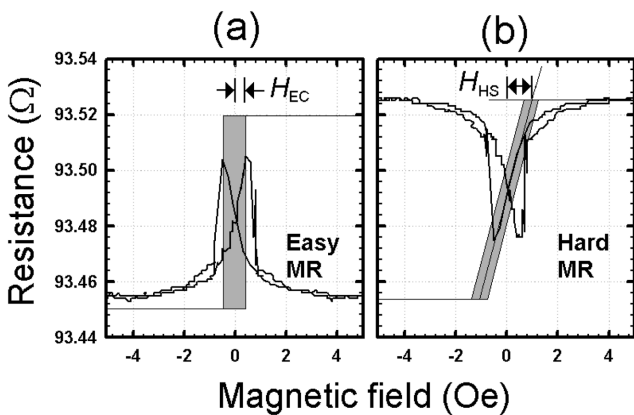


**Fig. 2.** (a) Comparison of 4-probe surface resistance versus thickness for the permalloy and conetic films. (b) The y-axis scale is Log (natural) to analyze the coverage property for initial growth of the permalloy and conetic films. Two films show island growth mechanism by nonlinearity of resistance versus thickness curve.

합금보다 4원소 합금에서 형성되는 계면 산란효과로 인하여 표면저항값이 증가할 수 있다.

Fig. 2(a)은 퍼멀로이박막과 코네틱 박막의 두께에 따른 4-단자의 표면저항값을 비교한 것이다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 같은 두께일 때 코네틱 박막의 표면저항값은 퍼멀로이 박막의 표면저항값보다 1.3~2.0배로 크게 나타났다. 또한 바닥층과 보호층인 Ta 박막 사이의 경계면에서 계면 산란효과와 확산효과로 퍼멀로이 박막보다 코네틱 박막에서의 표면저항값이 증가하였다. 상온에서 증착된 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막일 경우 y축을 자연대수 지수승으로 하여 Fig. 2(b)와 같이 두께에 따른 표면저항값의 곡선 변화율을 볼 때, 선형적으로 감소하지 않으므로 층간층(layer-by-layer) 덮임이 아니라 섬형(island) 구조로 증착되어 덮임이 이루어짐을 알 수 있다[12]. 하지만 증착시 기판의 온도를 100 °C 이상 유지하였을 때 섬형 성장구조에서 층간층 덮임 성장구조로 초기에 이루어짐으로써 박막의 표면 거칠기가 평탄할 것으로 사료된다[13].

Fig. 3은 Fig. 1(b)에 도시한 1 mm 폭의 4-단자와 전류 흐름에 의한 AMR 효과의 자기저항곡선을 보여주고 있다. 증착시 그림자 마스크를 이용한 박막의 시료는 전류 방향이 용이축과 수직이 되도록 설정하였다. Fig. 3(a)는 glass/Ta(5 nm)/Conetic(15 nm)/Ta(5 nm) 박막에 외부 자기장을 용이축 방향으로 인가하여 측정된 AMR 곡선이다. +5.0 Oe인 외부 자기장이 0 Oe을 지나 -0.25 Oe에서 최대값을 보였고, 다시 -5.0 Oe에서 0 Oe을 지나 +0.25 Oe에서 최대값을 보였다. 따라서 AMR 곡선과 대응하는 MH 곡선을 비교할 때  $H_{EC}$ 는 0.25 Oe이었다.



**Fig. 3.** Illustrations of MH loops and definitions of easy coercivity ( $H_{EC}$ ) and hard saturation field ( $H_{HS}$ ) from the (a) easy and (b) hard MR loops for the glass/Ta(5 nm)/Conetic(15 nm)/Ta(5 nm) film. Here  $H_{HS}$  is used to calculate the magnetic susceptibility ( $\chi = 10M_R$  (remanent magnetization)  $\div H_{HS}$ ). Here 10 is a compensated value of the extrapolated saturation field by Egelhoff's experimental data [1].

한편 Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에서 보인 곤란축의 방향으로 외부 자기장을 인가하여 측정된 glass/Ta(5 nm)/Conetic(15 nm)/Ta(5 nm) 박막의 일반적인 AMR 곡선이다. 곤란축의 AMR 곡선에 대응한 MH 곡선으로부터 보자력은 거의 0.3 Oe 부근이었지만 보통 자화율은 곤란축에서 측정된 MH 곡선으로부터 포화자기장  $H_{HS}$ 와 원점을 잇는 선형 기울기로 계산할 수 있다[1]. 곤란축의 포화자기장은 박막의 자화율을 계산하는데 있어서 중요한 특성인자이다. 기령 Fig. 3(b)에서  $H_{HS}$ 가 1.5 Oe, 초전도양자간섭소자(SQUID)로 측정된 자기모멘트는  $0.9 \times 10^{-4}$  emu, 계산된 잔류자화값  $M_R$ 은 775 emu/cc이었다. 여기서 측정된 시료의 체적은  $15 \text{ nm} \times 8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 이었다. 따라서 자화율 ( $\chi = 10M_R/H_{HS}$ )는 5,167의 값을 나타냈다[1, 14]. 자화율 계산식의 10은 Egelhoff 연구그룹의 실험결과로부터 추정된 보정값이다[1]. 또한 glass/Ta(5 nm)/NiFe(15 nm)/Ta(5 nm) 박막에 대해 위와 같은 방법으로 얻은  $H_{EC}$ ,  $H_{HS}$ ,  $\chi$ 는 각각 1.25 Oe, 3.12 Oe, 2,467으로 나타났다. 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막에 대한 보자력과 자화율의 특성을 Table I과 같이 비교하였다. Table I에서 알 수 있듯이 같은 두께에서 보자력과 자화율의 값을 비교해 보면 코네틱 박막이 퍼멀로이 박막보다 각각 1/5배 작고 2배 크므로 보다 우수한 초연 자성의 특성을 띠고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4는 이온빔 증착으로 제작한 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막의 두께에 따라 의존하는 용이축의 보자력과 곤란축의 포화자기장, 자화율을 나타낸 것이다[14]. Egelhoff가 처음으로 발표한 이론 및 실험결과에서 벌크나 샌드위치형 구조의 두께가 50 nm 일 때 이의 보자력은 0.05 Oe이었지만 본 연구처럼 두께 20 nm 이하 코네틱 박막에 대해 발표된 보고는 없었다[1]. 미세한 두께를 수월하게 조절할 수 있는 IBD에서 제작된 박막의 두께에 대해 살펴보면 3 nm에서 보자력은 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막의 비율로 1.8 Oe/1.2 Oe = 1.5이었으나 9 nm에서는 1.5 Oe/0.5 Oe = 3.0이었으며, 15 nm에서 30 nm로 두꺼워질 때 1.0 Oe/0.25 Oe = 4.0으로 변하여 코네틱 박막이 1/3~1/4배 정도 작은 보자력을 띠고 있음을 알 수 있었다. 그리고 자화율의 값을 결정짓는 곤란축의 포화자기장은 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막의 비율로 4.0 Oe/3.0 Oe = 1.3이었으나 9 nm에서는 3.3 Oe/3.0 Oe = 1.6이었으며, 15 nm

**Table I.** Typical easy coercivity, hard saturation field, remanent magnetization, and magnetic susceptibility of permalloy and conetic thin films with a thickness of 15 nm deposited on a Ta seed layer by ion beam deposition sputtering.

Thin films	Thickness	$H_{EC}$	$H_{HS}$	$M_R$	$\chi$
NiFe	15 nm	1.25 Oe	3.12 Oe	770 emu/cc	2,467
NiFeCuMo	15 nm	0.25 Oe	1.50 Oe	775 emu/cc	5,167

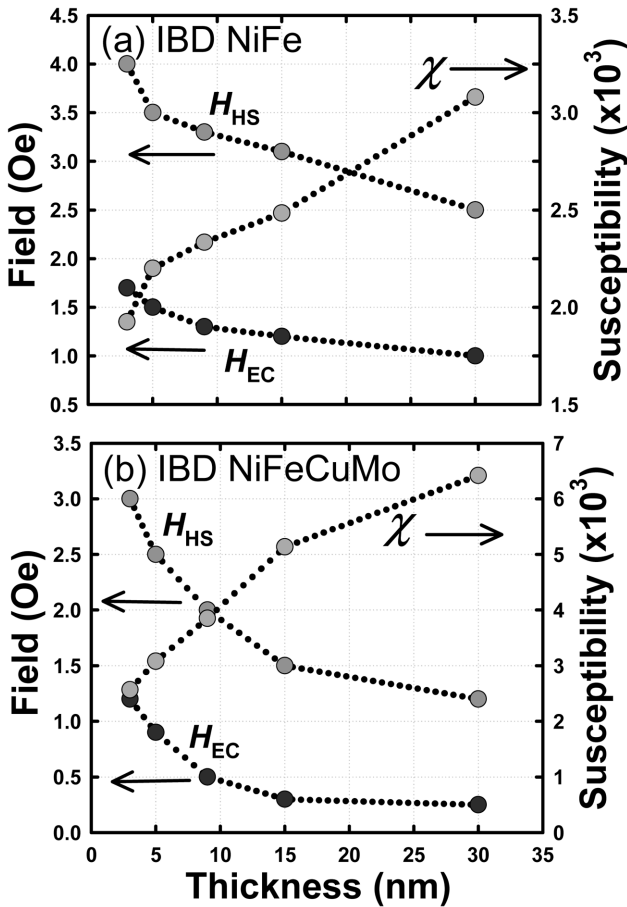


Fig. 4. Thickness dependence of the  $H_{EC}$ ,  $H_{HS}$ , and of permalloy and conetic thin films for the glass/Ta(5 nm)/NiFe, NiFeCuMo ( $t = 3\sim 30$  nm)/Ta(5 nm) film prepared by ion beam deposition (IBD).

에서 30 nm로 두꺼워질 때 2.5 Oe/1.2 Oe = 2.1으로 변하여 코네틱 박막이 1/1.3~1/2.1배 정도 작은 포화자기장을 띠고 있음을 알 수 있었다. 또한 자화율의 경우 퍼멀로이 박막과 코네틱 박막의 비율이 0.7이었으나 두께 9 nm에서는 0.3이었으며, 15 nm에서 30 nm로 두꺼워질 때 0.25로 변하여 코네틱 박막이 3~30 nm 일 때  $2.5 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^3$  정도로 퍼멀로이 박막보다 큰 자화율을 띠고 있음을 알 수 있었다.

초 연자성을 띠는 코네틱 박막이 단일박막으로 자기터널링 접합소자(magnetic tunnel junction; MTJ) 구조에서 자유층으로 존재할 경우, 반강자성체과 인접한 고정 강자성체층이  $Al_2O_3$  부도체층을 넘어 자유층 코네틱 박막에 상호결합력이 미쳐 보자력이 크게 증가하고 자화율을 크게 감소시키게 된다. 위에서 언급한 산란자기장(stray field)으로 인한 보자력 증가의 주요인 계면거칠기로 인한 orange peel 효과를 제거하는 방법인 두 코네틱층 사이에 Ru층을 둔 synthetic 구조를 형성할 때 얻은 보자력은 1/10배 정도 줄어들 것으로 사료된다. 이것은 이미 Egelhoff 그룹에서 연구결과로 발표하였

다[1] 이러한 결과에서 자유층을 퍼멀로이 박막 대신 코네틱 박막을 사용한다면 3~4배 정도 향상된 고감도 바이오 센서용 GMR-SV(giant magnetoresistance-spin valve)나 MTJ 소자로 활용할 수 있다[15, 16]. 본 연구는 보다 상세한 실험을 통해 최적화된 코네틱 박막을 이용하여 반강자성체 IrMn 및 FeMn와 Ru 사잇층의 Synthetic형 SV 박막소자 또는 MTJ 박막소자를 제작하여 초연자성의 특성에 대해 추후 발표하고자 한다.

#### IV. 결 론

이온빔 증착법으로 제작한 코닝유리(Corning glass)/Ta(5 nm)/(Permalloy, Conetic)/Ta(5 nm) 박막에 대한 연자성의 특성에 대해 연구하였다. 퍼멀로이(Permalloy)층과 코네틱(Conetic)층을 증착하여 인가 자기장 방향에 용이축과 곤란축의 자기저항곡선으로부터 얻은 보자력과 포화자기장에 대해 각각 비교하였다. 코네틱 박막의 표면저항값은 퍼멀로이 박막의 표면저항값보다 1.3~2.0배로 크게 나타났다. 두께에 따른 표면저항값의 곡선 변화율을 살펴보았을 때, 이는 섬형(island) 구조로 증착되어짐을 알 수 있었다. 코네틱 박막이 퍼멀로이 박막에 비해 1/3~1/4배 정도 작은 보자력을 가졌으며, 자화율의 값을 결정짓는 곤란축의 포화자기장에 대한 비율을 적용하여 얻은 코네틱 박막이 3~30 nm일 때  $2.5 \times 10^3 \sim 6.5 \times 10^3$  정도로 퍼멀로이 박막보다 큰 자화율을 띠고 있어서 퍼멀로이 박막보다 연자성의 특성이 높은 코네틱 박막을 이용하여 스핀밸브나 터널접합의 소자를 개발할 수 있는 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0073065).

#### 참고문헌

- [1] W. F. Egelhoff Jr., R. D. McMichael, C. L. Dennis, M. D. Stiles, F. Johnson, A. J. Shapiro, B. B. Maranville, and C. J. Popwell, *Thin Solid Films*, **505**, 90 (2006).
- [2] N. A. Stutzke, S. E. Russek, D. P. Pappas, and M. Tondra, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10Q107 (2005).
- [3] C. W. Chen, *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials*, Dover, New York (1986).
- [4] M. Tondra, J. M. Daughton, C. Nordman, D. Wang, and J. Taylor, *J. Appl. Phys.*, **87**, 4679 (2000).
- [5] X. Liu, C. Ren, and G. Xiao, *J. Appl. Phys.*, **92**, 4722 (2002).

- [6] M. E. McHenry, M. A. Willard, and D. E. Laughlin, *Prog. Mater. Sci.*, **44**, 291 (1999).
- [7] F. Pfeifer and C. Radeloff, *J. Magn. Magn. Mater.*, **19**, 190 (1980).
- [8] S. H. Park, K. S. Soh, G. Yoon, and S. S. Lee, *J. Kor. Phys. Soc.*, **54**, 2052 (2008).
- [9] S. S. Lee, B. Y. Kim, J. Y. Lee, D. G. Hwang, S. W. Kim, M. Y. Kim, J. Y. Hwang, and J. R. Rhee, *J. Appl. Phys.*, **95**, 7525 (2004).
- [10] H. E. Yang and H. S. Lee, *Electromagnetic Materials*, (Korean), Namdo Books, pp. 42, 98 (2001).
- [11] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Eighth Ed. John Wiley & Sons Inc, pp. 634-640 (2005).
- [12] D. Seong, S. S. Lee, and D. Youm, *Solid State Commun.*, **76**, 1341 (1990).
- [13] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films*, 2nd Ed., Academic Press, pp. 495-558 (2002).
- [14] J. G. Choi, J. H. Choi, K. A. Lee, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, Submitted to *J. Kor. Phys. Soc.* (2009).
- [15] D. W. Kim, J. H. Lee, M. J. Kim, and S. S. Lee, *J. Magnetism*, **14**, 80 (2009).
- [16] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magnetism*, **14**, 18 (2009).

## Comparison of Soft Magnetic Properties of Permalloy and Conetic Thin Films

Jong-Gu Choi<sup>1</sup>, Do-Guwn Hwang<sup>1,2</sup>, and Sang-Suk Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Dept. of Eastern-western Biomedical Engineering, Graduation, Sangji University, Wonju, Gangwondo 220-702, Korea*

<sup>2</sup>*Dept. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju, Gangwondo 220-702, Korea*

Jang-Roh Rhee

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

(Received 13 July 2009, Received in final form 21 August 2009, Accepted 21 August 2009)

The soft magnetic property for the Corning glass/Ta(5 nm)/[Conetic, Permalloy]/Ta(3 nm) prepared by the ion beam deposition sputtering was investigated. The coercivity and saturation magnetic field of conetic (NiFeCuMo) and permalloy (NiFe) layer with easy and hard direction along to the applying magnetic field during deposition was compared with each other. The surface resistance of conetic film with a thickness of 10 nm was 2 times lower than one of permalloy film. The coercivity and the magnetic susceptibility of conetic film decreased and increased 3 times to one of permalloy film, respectively. These results suggest that a highly sensitive GMR-SV or MTJ using conetic film can be possible to develop the bio-device.

**Keywords** : ion beam deposition (IBD) method, conetic thin film, permalloy thin film, coercivity, soft magnetic property, magnetic susceptibility