

## Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/[Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>-Mn]/Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> 다층박막에서 Mn 함유량에 의존하는 교환결합력과 열적안정성

김보경 · 이진용 · 김순섭 · 황도근 · 이상석\*

컴퓨터전자물리학과, 상지대학교, 우산동, 원주 220-702

황재연 · 김미양 · 이장로

물리학과, 숙명여자대학교, 청파동, 용산구, 서울 140-742

(2003년 6월 20일 받음, 2003년 9월 15일 최종수정본 받음)

IrMn에 Mn을 첨가시킨 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/[Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>-Mn]/Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> 다층박막을 상온에서 이온빔 증착(ion beam deposition: IBD)법으로 제작하여 그 자기적 및 열적 특성을 연구하였다. Mn이 첨가된 NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막은 Mn이 첨가되지 않은 순수 합금 IrMn 박막 위의 CoFe 고정층 보다 큰 교환결합력( $H_{ex}$ )과 방해온도(blocking temperature:  $T_b$ )를 가지고 있었다. Mn이 첨가되지 않는 Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>와 CoFe 사이의  $H_{ex}$ 는 상온에서 거의 없었으나, 250 °C 열처리 후 100 Oe로 나타났다. IrMn 내에서 76.8-78.1 vol% Mn일 때,  $H_{ex}$ 와  $T_b$ 는 크게 향상되었고, Mn이 0.6 vol%씩 증가함에 따라 크게 줄어들었다. NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막 구조에서 [(111)CoFe, NiFe]/(111)IrMn<sub>3</sub>인 x-선 회절 피크비 평균값은 75.5, 77.5, 79.3 vol% Mn일 때 각각 1.4, 0.8, 0.6였다. 특히, 열처리 전 77.5와 78.7 vol% Mn일 때,  $H_{ex}$ 는 각각 259와 150 Oe였다. 77.5 vol% Mn인 경우,  $H_{ex}$ 가 열처리 온도 350 °C까지 475 Oe였으며, 450 °C에서는 200 Oe로 크게 감소하였다. 따라서 합금형 반강자성체 IrMn에서 높은  $H_{ex}$ 와  $T_b$ 를 얻을 수 있는 최적의 Mn 함유량의 존재를 확인하였다.

주제어 : NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막, 교환결합력, Mn 함유량, vol% Mn, 열적안정성

### I. 서 론

여러 가지 반강자성체 물질로서 Mn 합금형태인 FeMn, IrMn, PtMn, NiMn 등은 열처리 후에 300 Oe 이상의 교환결합력을 쉽게 얻을 수 있다[1,2]. 이중 반강자성층 IrMn로 하여 개발한 스핀밸브나 터널링 접합 소자는 300 °C 이상의 방해온도(blocking temperature:  $T_b$ )를 갖는 우수한 열적 안정성을 갖고 있어서 자기저항 센서로서 실용화하기에 이르렀다. 그러나 Mn 합금 반강자성체에 인접한 계면을 이루고 있는 강자성체 CoFe, NiFe 층들은 Mn이 계면을 통한 이웃층으로 확산이 왕성하므로 열처리 온도나 자성층의 두께 및 종류에 따라 교환결합 세기의 변화에 큰 영향을 주게 된다[1-3]. 더욱이 열처리 도중에 일어나는 Mn 확산 정도는 GMR(giant magnetoresistance) 스핀밸브 박막 혹은 TMR(tunneling magnetoresistance) 박막에서 이웃층의 계면 손상과 터널 장벽 산화층으로 선호적인 Mn 원자의 이동을 통해 터널링 자기 수송 특성을 완화 내지 손상시키는 중요한 요인으로 알려져 있다[4, 5]. 열처리 전과 후 반강자성층에 있는 Mn 확산에 의한 자성층의 손상을 피하기 위하여 Mn 확산 장벽층으로 NOL(nano oxide layer)을 삽입한 연구결과도 보고되었다[2, 6]. 열처리 전과 후의 자기적 특

성의 변화가 비교적 큰 IrMn에서 Mn 성분때 따른 fcc 결정성 및 교환결합세기의 변화를 상세히 관찰하는 것이 필요하다. Mn 확산 때문에 발생한 반강자성층의 Mn 결핍 또는 상변화를 극초박막 Mn 층 삽입에 의한 보상효과를 적용하여 교환결합력 및 열적안정성을 향상시킨 실험결과로 소개한다. 본 연구에서는 열적안정성과 교환결합력이 향상된 최적의 반강자성체 IrMn 박막을 얻기 위해 기존의 합금형태의 Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub> 층에 Mn 박막을 삽입시킨 다층박막 형태를 이온빔 증착(ion beam deposition: IBD)법으로 하였다[7, 8]. 상·하부층이 각각 CoFe과 NiFe 박막이 있는 NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe다층박막을 진공 열처리를 통해 얻은 교환결합력과 열적안정성의 향상 특성을 조사하였다.

### II. 실험방법

시료들은 유리기판(코닝 #7059) 위에 [IrMn-Mn]<sub>20</sub> 다층박막 구조를 만들기 위해 사용한 IBD 스퍼터링 시스템을 이용하여 상온에서 제작하였다. IBD 시스템은 메인 챔버와 load-lock 챔버로 분리되어 있다. 메인 챔버 내에 타겟 이온건과 기관에칭용 이온건 그리고 6개의 3-인치 타겟이 장착된 초진공(ultra-high vacuum: UHV) 이온빔 증착 장치는 기본 진공도가  $5 \times 10^{-9}$  Torr였다. 사용한 이온 건은 3-cm 흑연(graphite)

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

그리드(grid) 크기의 카프만소스(Kauffmann source)였다[9]. 타겟과 시편의 거리는 약 100 mm였다. 이온 빔 생성에 필요한 아르곤 가스 분압은 0.1 mTorr로 하였고, 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온 빔 전압 및 전류 값을 각각 100, 35, 800 V 및 6.0 mA로 하였다. 이 조건에서 타겟 Ta, Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>, Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>, Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>, Mn의 증착율은 각각 0.20, 0.32, 0.23, 0.32, 0.1 Å/s였다.

증착 중에 일축 이방성을 유도하기 위한 자기장의 크기는 350 Oe였다. 전형적인 박막구조는 Fig. 1에 나타냈듯이 glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å)이다. Mn 첨가는 IrMn(5 Å)과 Mn(단원자층 이하의 두께 0.3~1.8 Å)을 번갈아 증착하는 적층 형태로 기판 위에 20층의 [IrMn-Mn]<sub>20</sub> 다층박막 구조를 형성하도록 제작하였다[1, 10]. 증착된 각 시료의 IrMn 박막을 에너지분광 x-선 분석 스펙트럼(energy dispersive analysis spectrum: EDAX)과 원자현미경(atomic force microscope: AFM)으로 분석하여 증착된 성분비와 표면거칠기를 조사하였다.

열처리 전후의 특성을 비교 관찰하기 위해 각 시료에 대한 열처리리는 1.0×10<sup>-6</sup> Torr 진공과 1 kOe 자기장 하에서 원하는 열처리 온도에 2시간 씩 머물렀다. 열처리 전후 시료의 결정 세기 관찰은 x-선 회절기(x-ray diffraction: XRD)로 하였으며, Fig. 1에 표시한 NiFe(하부)/[IrMn-Mn]/CoFe(상부) 다층박막의 하부층 보자력(coercivity: H<sub>1c</sub>), 하부층 교환결합력(exchange coupling field: H<sub>1ex</sub>), 상부층 보자력(H<sub>2c</sub>), 그리고 상부층 교환결합력(H<sub>2ex</sub>)은 진동시료자력계(vibrating sample magnetometer: VSM)와 상온에서 측정된 4단자 자기저항 측정 시스템으로 얻은 M-H 히스테리시스 곡선과 이방성자기저항(anisotropy magnetoresistance: AMR) 곡선으로부터 각각 결정하였다.

### III. 실험결과 및 분석

사용된 IrMn 타겟과 증착된 박막의 원자성분비는 각각 22.0:78.0과 21.8:78.1로 거의 비슷하였다. 이것은 빨빨이 흩어진 원자 진행 특성이 있는 Mn의 에칭율과 스퍼터 거둠율

(sputter yield)을 Ir도 비슷하게 갖고 있기 때문으로 사료된다 [11]. [IrMn-Mn]<sub>20</sub> 다층박막에서 극초박막 Mn 삽입에 의한 IrMn 합금 박막을 EDAX 조사된 원자 및 질량 조성비와 Mn 삽입층 두께를 보정한 부피 농도의 값들을 Table I에 나타냈다. 삽입층 Mn이 0.9 Å일 때 20.1:79.9으로 나타났고, 1.8 Å일 때는 18.3:81.7으로 나타났다. 이에 대응한 Mn의 부피농도는 각각 77.7, 79.3 %이었다. glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) 다층박막에 대해 4-단자 법으로 측정된 표면저항 (sheet resistance; R<sub>s</sub>) 값들은 Mn이 0 Å일 때 102.15 Ω에서 Mn이 0.9 Å일 때 96.49 Ω, 1.8 Å일 때 91.01 Ω으로 단조롭게 감소하는 현상이 나타났다.

상온에서 증착한 Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) 다층박막에 대한 x-선 회절 2θ-θ 주사 무늬로부터 얻은 (111)IrMn<sub>3</sub>과 [(111)CoFe, NiFe] 회절 피크의 비를 Mn층 삽입에 따른 원자조성비 의존성을 조사하였다. Fig. 2에서 보여 주듯이 두 회절 피크의 분리는 Mn 삽입층이 없을 때 피크비가 1.4로 [(111)CoFe, NiFe]가 우세하게 나타났고, 삽입한 Mn 총 두께가 36 Å인 다층박막에 대해 조사된 fcc 결정조직의 XRD 세기 [(111)CoFe, NiFe]/(111)IrMn<sub>3</sub> 값은 0.6으로 Mn층이 증가함에 따라 (111)IrMn<sub>3</sub> 회절세기가 단조롭게 증가하는 경향을 보였다. 이로서 비퍼층 Ta의 초기성장에서 생긴 (111)NiFe 결정방향 성장은 결정 조직 형태로 이루어진다는 사실을 뒷받침하고 있다. 이로서 반강자성 (111)IrMn<sub>3</sub> 결정세기 피크가 NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막 내의 교환결합력을 결정할 수 있는 중요한 것 중 하나임을 확인할 수 있었다. 이미 본 연구팀에 의해 [FeMn-Mn] 다층박막의 경우 Mn 삽입층의 증가는 (111)FeMn 회절세기를 감소시키고 (111)NiFe 회절세기를 증가 시켜서 반강자성체와 자성체간의 교환결합을 강하게 일으킴을 보고하였다[12]. 이로서 IrMn과 FeMn의 결정조직과 교환결합력은 서로 상반된 특성을 보여 주어서 각각의 고유 반강자성체 특성을 내포하고 있다고 보여진다.

[IrMn-Mn]<sub>20</sub> 다층구조에 하부층에 NiFe을, 그리고 상부에

**Table I.** Atomic, weight, volume percent of Ir:Mn, and sheet resistance R<sub>s</sub> (Ω) changes depending on the inserted Mn layer thickness.

Inserted Mn tickness (Å)		0.0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
Atomic %	Ir	21.84	21.25	20.96	20.66	20.07	19.48	18.89	18.30
	Mn	78.16	78.75	79.04	79.34	79.93	80.52	81.11	81.70
Weight %	Ir	49.44	48.55	48.10	47.65	46.76	45.87	44.97	44.08
	Mn	50.56	51.45	51.90	52.35	53.24	54.13	55.03	55.92
Volum % (vol% Mn)		75.57	76.22	76.54	76.86	77.50	78.11	78.73	79.32
Sheet resistance R <sub>s</sub> (Ω)		102.15	102.91	105.32	99.78	96.49	97.18	95.83	91.01

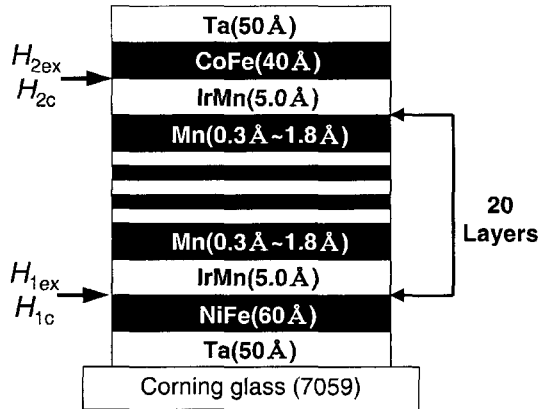


Fig. 1. Schematic structure of the glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) films: The inserted Mn layers have six different thicknesses such as: 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, and 1.8 Å.

IrMn/CoFe를 증착했을 때, Fig. 1에 도시한 다층구조Ta/NiFe/[IrMn-Mn]<sub>20</sub>/IrMn/CoFe/Ta 박막의 상·하부 자성층들의 H<sub>ex</sub>와 H<sub>c</sub>를 조사하였다. IrMn층에 인접한 하부층(NiFe)과 상부층(CoFe)의 극 초-Mn 박막 두께별 효과는 서로 그 특성이 다르게 나타난다. Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(0.9 Å)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) 다층박막에 대해 열처리 전후 측정된 M-H 곡선과 그에 대응한 자기저항곡선은 Fig. 3(a)와 (b)에 각각 나타났다. 열처리전 하부층 NiFe의 교환결합력(H<sub>1ex</sub>), 보자력(H<sub>1c</sub>)과 상부층 NiFe의 교환결합력(H<sub>2ex</sub>), 보자력(H<sub>2c</sub>) 값들은 각각 66, 10와 259, 53.0 Oe였다. 상부층 CoFe는 IrMn이 하부층 NiFe 결정성장보다 양호함과 박막이 내포하는 결함(defect), 계면전위(dislocation), 낱알 경계(grain boundary)의 수 및 표면거칠기의 증가 등의 요인들로 인한 반강자성체와 강자성체들간의 오렌지 껍질 결합(orange peel coupling)이 우세하여 보다 큰 H<sub>2ex</sub>, H<sub>2c</sub> 값들로 나타난 것으로 사료된다[13-15]. Fig. 3(b)에서 보듯이 250 °C, 2시간 동안 열처리 한 후 MH-loop와 MR 곡선에서 얻은 H<sub>1ex</sub>, H<sub>1c</sub>와 H<sub>2ex</sub>, H<sub>2c</sub> 값들은 각각 54, 11와 424, 55.0 Oe으로 나타났다. 그러나 열처리 효과로 인해 상부층 교환결합력(H<sub>2ex</sub>)만 크게 증가하였다.

Fig. 4(b)는 삽입한 Mn층 0.9 Å인 다층박막 시료의 열처리 효과에 대한 열적안정성을 관찰하기 위해 상온에서 XRD와 자기저항곡선을 측정하여 얻은 상·하부층 보자력과 교환결합력의 열처리 온도의존성을 나타낸 것이다. 하부층 보자력(H<sub>1c</sub>)은 150 °C까지는 약 5 Oe를 유지하다가 그 이상의 온도에서는 급격한 증가를 보였다. 그러나 상부층 보자력(H<sub>2c</sub>)은 350 °C까지 증가하다가 그 이상의 온도에서는 감소하였다.

Fig. 4(b)에 보여준 fcc 결정조직의 x-선 회절 피크비인

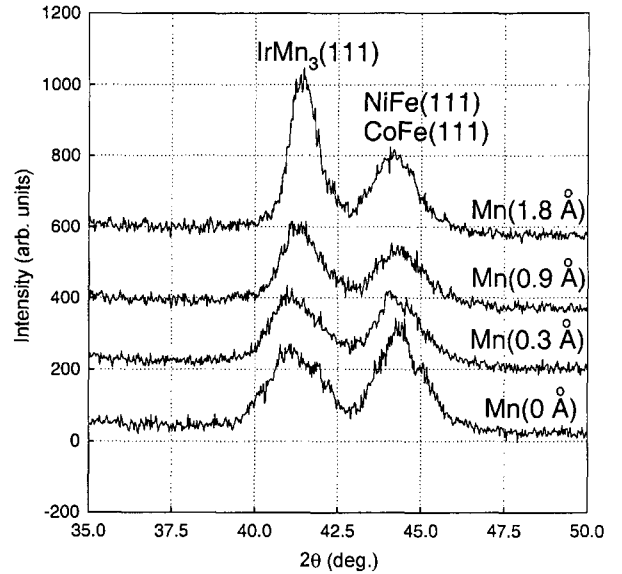


Fig. 2. XRD patterns for the glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) films: Mn (t = 0, 0.3, 0.9, 1.8 Å).

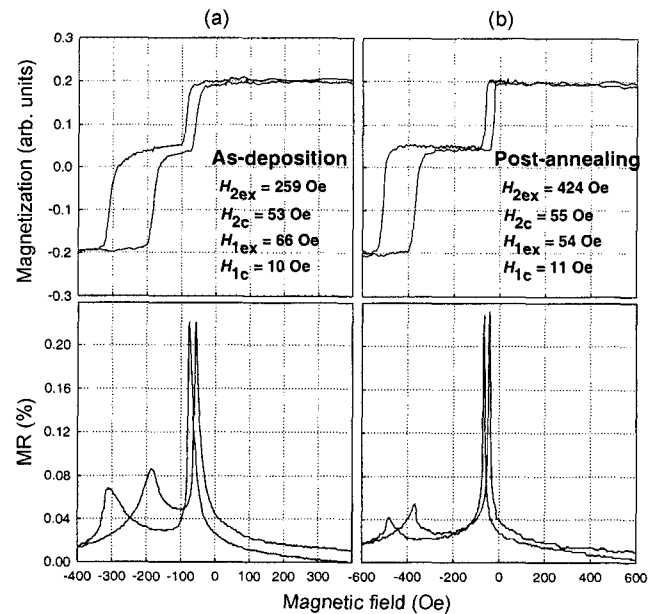


Fig. 3. MH-loops and MR curves for the (a) as-deposited and (b) post-annealed glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(0.9 Å)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) film. The annealing conditions are the staying time of 2 hrs at annealing temperature of 250 °C, base vacuum pressure of  $3 \times 10^{-6}$  Torr, and under the field of 1 kOe. The MR curves are measured by four-probe method at room temperature. The H<sub>2ex</sub>, H<sub>1c</sub>, H<sub>2ex</sub>, and H<sub>2c</sub> are noted in the corresponding MH-loops and MR curves.

[(111)CoFe, NiFe]/(111)IrMn<sub>3</sub> 값은 열처리온도 350 °C까지 단조롭게 감소하다가 그 이상의 열처리온도 450 °C에서 급격히 감소하였다. 이것은 Fig. 2에서 언급하였듯이 Mn이 증가

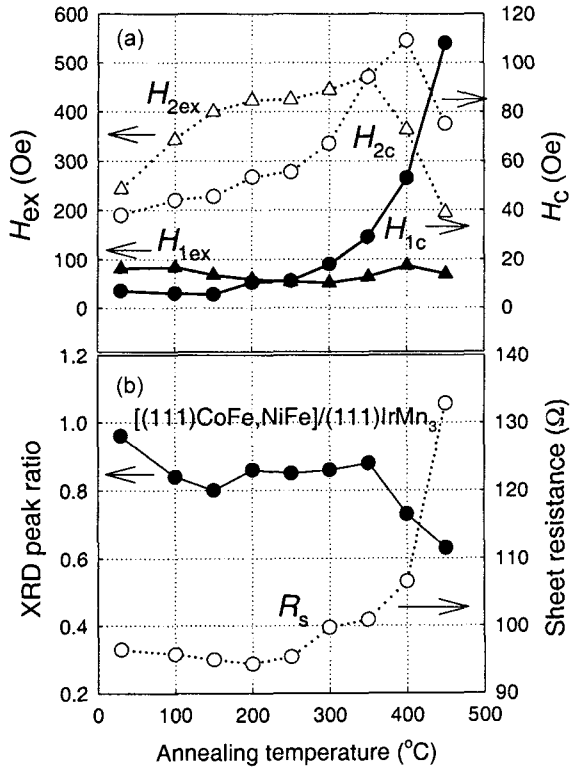


Fig. 4. Annealing effects of (a)  $H_{1ex}$  and  $H_{2ex}$ ,  $H_{1c}$  and  $H_{2c}$ , (b) X-ray peak ratios of fcc (111)CoFe, NiFe/(111)IrMn<sub>3</sub> and sheet resistance ( $R_s$ ) for the glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(0.9 Å)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) film.

함에 따라 (111)IrMn<sub>3</sub>의 증가로 우세한 IrMn의 결정성을 갖게 되는 비슷한 경향을 띠고 있다. 즉 Mn 증가가 열처리 효과에 의한 빠른 확산 때문에 반강자성체 (111)IrMn<sub>3</sub>상의 우세를 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 4(b)은 삽입한 Mn층 0.9 Å인 다층박막에 대한 열처리 온도에 따른 XRD 피크비율과  $R_s$ 의 변화를 관찰한 것이다. 상부 IrMn/CoFe층의 교환결합력은 350 °C까지 475 Oe로 증가하다가 450 °C에서 200 Oe로 감소하였다. 반면에 하부 NiFe/IrMn층의 교환결합력은 450 °C까지 60~100 Oe로 큰 변화가 없이 안정한 값을 유지하는 경향을 보인다. 열처리 온도 증가에 따라 Mn 확산효과가 점진적으로 증가하다가 350 °C 이상으로 될 때 상부층의 교환결합력이 갑자기 감소하는 효과와 대응되게 표면저항이 급격히 증가함을 Fig. 4(b)에서 보여준다. 이는 다층박막 표면에서부터 상부 자성층까지 계면 손상과 확산을 동반한 석입과 더불어 진공도가 10<sup>-6</sup> Torr인 열처리 챔버 내에 잔류하는 산소가 고온에서 높은 이동도 갖는 원자들을 산화로 인한 것으로 사료된다[10].

Fig. 5는 glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(0.9 Å)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) 다층박막에 대한 표면형상 구조인 3D-AFM 영상들을 나타내었다. 0.7×0.7 μm<sup>2</sup> 주사영

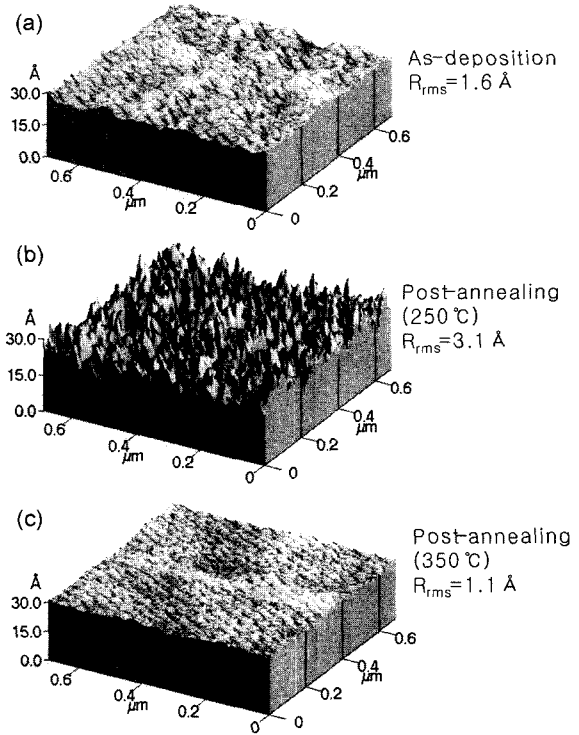


Fig. 5. 3D AFM images of (a) as-deposited and post-annealed samples at (b) 250 °C, and (c) 350 °C for the glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(0.9 Å)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) films. The scan area was 0.7 μm×0.7 μm. The values of  $R_{rms}$  for each sample were noted in the right side.

역에 대한 표면거칠기(rms roughness;  $R_{rms}$ )값을 분석한 결과는 상온과 250, 350, 450 °C에서 2시간 동안 열처리 후 각각 1.6, 3.1, 1.1, 1.2 Å로 측정되었다. Fig. 3(b)에 나타났듯이 250 °C로 열처리된 시료에서는 안정된 MH-loop 모양을 갖는 424 Oe의  $H_{ex}$ 에 대응했을 때  $R_{rms}$  값이 열처리 전 보다 2배로 증가하였다. 반면에 불안정한 자기적 특성을 내포한 350, 450 °C의 열처리 온도에서 다시  $R_{rms}$ 값이 열처리 전과 비슷한 값인 1.1~1.2 Å으로 줄어든 특이한 현상이 관찰되었다. 열처리 온도에 의존하는  $R_{rms}$ 값의 경향을 볼 때, 열처리 온도 250 °C에서는 다층박막 내에 적절한 Mn 확산으로 인하여 층간의 계면거칠기를 크게하고, 작은 낱알 경계의 수를 생성케 되어  $R_{rms}$ 가 증가한 것으로 사료된다[5, 10]. 표면 NOL층을 이용한 거울반사형 스핀밸브 박막의 표면거칠기가 감소하듯이[16], 350 °C 이상일 때는 진공 열처리 챔버 내에 잔류 산소가 산화층을 형성하여 골이 높은 표면 산화층이 골이 낮은 곳으로 이동하거나 떨어져 나가는 미세구조의 변화가 표면거칠기를 감소케 하는 하나의 요인으로 사료된다. 이로서 최적의 열처리 온도에서 빨빨이 산란하는 정도가 강한 Mn 원자는 주로 결정 조직의 결함이 생성되고 치밀도가 약해 낱알 경계로 빠른 Mn 확산 이동 효과가 상부 CoFe층의 자성특성

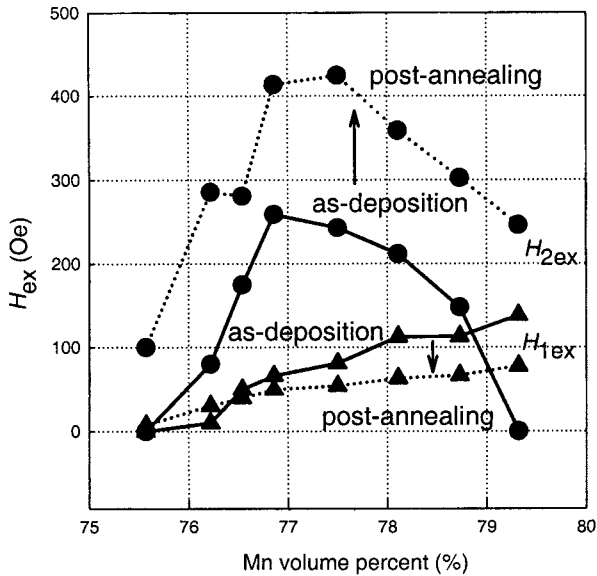


Fig. 6. Mn content dependence of the exchange coupling fields  $H_{1ex}$  (filled triangles) and  $H_{2ex}$  (filled circles) for the as-deposited (solid line) and post-annealed (dotted line) glass/Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/[IrMn(5 Å)-Mn(t)]<sub>20</sub>/IrMn(5 Å)/CoFe(40 Å)/Ta(50 Å) films as a function of the volume percent of Mn(t). The annealing treatment was 2 hrs at 250 °C. The arrows are guides for the change from as-deposited to after annealing state.

의 향상시키는 영향을 주고있다고 사료된다. 그러므로 반강자성체 IrMn에 Mn 확산으로 인한 결핍을 극 초박막 Mn 원자층의 삽입에 의한 보상으로 NiFe/[IrMn-Mn]<sub>20</sub>/IrMn/CoFe 다층박막에서 교환결합력과 열적안정성 향상을 얻을 수 있었다. 또한 향상된  $H_{ex}$ 와 350 °C 이상의  $T_b$ 로 우수한 열적안정성을 보여 주는 IrMn의 반강자성체 특성을 얻을 수 있었다.

Fig. 6에서는 또한 Table I에 나타낸 Mn층의 삽입 두께 양을 vol%로 하였을 때, 열처리 전 후 시료의 하부(NiFe/IrMn;  $H_{1ex}$ )층과 상부(IrMn/CoFe;  $H_{2ex}$ )층에 유도된  $H_{ex}$ 의 Mn 함유량에 대한 의존성을 나타냈다. 열처리 전  $H_{2ex}$ 는 75.5 vol% Mn일 때 거의 없다가, 76.2 vol% Mn일 때 82 Oe으로 증가하여 76.8 vol% Mn일 때 최대 값인 265 Oe였다. 다시 77.5 vol% Mn일 때부터 감소하다가 79.3 vol% Mn일 때  $H_{2ex}$ 는 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과로 볼 때, IrMn에 삽입한 Mn 부피 농도가 75.5에서 79.3 vol% Mn까지 영역에서 매우 민감한 특성을 갖고있음이 알 수 있었다. 그러나 시료에서  $H_{ex}$ 는 Mn을 삽입할수록 단조롭게 증가하였다. Mn 층이 삽입된 다층박막을 250 °C, 2시간 동안 열처리하였을 때,  $H_{1ex}$ 은 전체적으로 약간 감소하지만  $H_{2ex}$ 을 얻을 수 없는 75.5과 79.3 vol% Mn에서도 각각 100와 145 Oe로 나타났다. 특히 열처리 후 77.5 vol% Mn에서  $H_{ex}$ 의 최대값인 424 Oe

를 얻을 수 있었다.

IrMn내 Mn 함유량이 76 % 이하일 때, 교환결합이 거의 없다가, 76.2 % 이상일 때 급격히 증가하고 Mn 함유량이 78.1 % 이상이 되면 교환결합이 감소하는 자기적 특성은 Mn 합금박막인 반강자성체를 이용한 스핀밸브 소자나 터널링 소자의 특성을 향상시키는 매우 중요한 요인이 될 수 있다. 이미 앞에서도 언급하였듯이 Mn 원자들의 확산효과로 인한 적절한 Mn 함유량을 유지해야 결핍한 Mn 위치에 빈자리를 채우게 된다. 이것은 IrMn의 결정 조직을 향상시켜 교환결합력이나 열적안정성을 높일 수 있도록 한다. Mn이 과함유량(overdose content)일 경우, 이웃한 자성층 쪽으로 Mn의 빠른 확산과 이동(migration) 등은 열처리 과정에서 계면손상을 발생시키고, 자성층 내부에 있는 과잉 Mn 원자들은 자성층 원자인 Mn, Fe, Ni과 결합시켜 작은 낱알 경계 생성하고 계면 거칠기에 영향을 준다고 볼 수 있다. 따라서 열처리 효과가 없어도 상온에서 Mn 함유량을 조절하여 IrMn 반강자성체와 자성체간의 높은 교환결합력과 열적안정성의 특성을 갖는 자기저항 소자 개발에 기여할 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

IrMn에 Mn 첨가된 NiFe/IrMn/CoFe 다층박막을 상온에서 IBD법으로 증착하여 교환결합력과 열적안정성을 연구하였다. Mn이 첨가된 NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막은 Mn이 첨가되지 않은 순수 합금 IrMn 박막 위의 CoFe 고정층 보다 큰  $H_{ex}$ 와  $T_b$ 를 가지고 있었다. 그러나 Mn이 첨가되지 않은 Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>와 CoFe사이의  $H_{ex}$ 는 상온에서 거의 없었으나, 250 °C 열처리후 100 Oe로 나타났다. IrMn내에서 76.8-78.1 vol% Mn의 함유량일 때,  $H_{ex}$ 와  $T_b$ 는 향상되었으나, 0.6 vol% Mn 씩 증가함에 따라 크게 줄어들었다. NiFe/[IrMn-Mn]/CoFe 다층박막에서 x-선 회절세기[(111)CoFe, NiFe]/(111)IrMn<sub>3</sub> 평균 피크비 값은 75.5, 77.5, 79.3 % Mn일 때 각각 1.4, 0.8, 0.6였다. 특히, 열처리 전 77.5과 78.7 vol% Mn일 때,  $H_{ex}$ 는 각각 259와 150 Oe였다. 77.5 vol% Mn인 경우,  $H_{ex}$ 가 열처리 온도 350 °C까지 475 Oe였으며, 450 °C에서는 200 Oe로 크게 감소하였다. 따라서 합금형 반강자성체 IrMn에서 높은  $H_{ex}$ 와  $T_b$ 를 얻을 수 있는 최적의 Mn 함유량의 존재함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구 결과는 2002-2003 상지대학교 교내 연구과제의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] M. J. Carey, A. Kellock, L. Baril, J. R. Childress, T. Le, T. Thompson, and B. A. Gurney, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 5198 (2002).
- [2] B. Dai, J. W. Cai, W. Y. Lai, F. Shen, and Z. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3722 (2003).
- [3] J. C. Eckert, N. P. Stem, D. S. Snowden, and P. D. Sparks, *J. Appl. Phys.* **93**, 6608 (2003).
- [4] C. S. Yoon, J. H. Lee, and C. K. Kim, *J. Appl. Phys.* **93**, 8910 (2003).
- [5] J. H. Lee, S. J. Kim, C. S. Yoon, C. K. Kim, B. G. Park, and T. D. Lee, *J. Appl. Phys.* **92**, 6241 (2002).
- [6] S. H. Jang, T. Kang, H. J. Kim, and K. Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 105 (2002).
- [7] S. W. Kim, J. H. Kim, B. K. Kim, J. K. Kim, J. R. Rhee, S. S. Lee, and D. G. Hwang, *J. Appl. Phys.* **93**, 6602 (2003).
- [8] B. K. Kim, J. H. Kim, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Kor. Mag. Soc.* **12**, 132 (2002).
- [9] H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper, *J. Vac. Sci. Tech.* **21**, 725 (1982).
- [10] B. K. Kim, J. Y. Lee, S. H. Ham, S. S. Lee, and D. G. Hwang, *J. Kor. Mag. Soc.* **13**, 53 (2003).
- [11] Ion Beam Etch Rate and Sputter Yield, (Commonwealth Science Corporation's Catalog, 1999), CSC Job Number: 5622.
- [12] S. S. Lee, D. G. Hwang, and C. M. Park, *J. Mag. Mater.* **198-199**, 70 (1999).
- [13] K. Y. Kim, S. H. Jang, K. H. Shin, H. J. Kim, and T. Kang, *J. Appl. Phys.* **89**, 7612 (2001).
- [14] K. Li, Y. Wu, J. Qiu, G. Han, Z. Guo, H. Xie, and T. Chong, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3663 (2001).
- [15] J. Langer, R. Mattheis, B. Ocker, W. Maaß, S. Senz, D. Hesse, and K. Kruaß lich, *J. Appl. Phys.* **90**, 5126 (2001).
- [16] W. F. Egelhoff Jr., P. J. Chen, C. J. Powell, D. Parks, G. Serpa, R. D. McMichael, D. Martien, and A. E. Berkowitz, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, 1702 (1999).

## Exchange Coupling Field and Thermal Stability of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/[\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}\text{-Mn}]/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ Multilayer Depending on Mn Content

B. K. Kim, J. Y. Lee, S. S. Kim, D. G. Hwang, S. S. Lee\*

*Department of Computer and Electronic Physics, Sang-Ji University, Wonju 220-702, Korea*

J. Y. Hwang, M. Y. Kim, and J. R. Rhee

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

(Received 20 June 2003, in final form 15 September 2003)

The magnetic and thermal properties of  $\text{NiFe}/[\text{IrMn-Mn}]/\text{CoFe}$  with Mn additions have been studied. As-deposited  $\text{CoFe}$  pinned layers with  $[\text{IrMn-Mn}]$  layer had dominantly larger exchange biasing field ( $H_{ex}$ ) and blocking temperature ( $T_b$ ) than those with pure  $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$  used. The  $H_{ex}$  and  $T_b$  improved with 76.8-78.1 vol% Mn, but those of the  $\text{NiFe}/\text{IrMn}/\text{CoFe}$  dropped considerably with more addition of 0.6 vol % Mn. The average x-ray diffraction peak ratios of fcc [(111) $\text{CoFe}$ ,  $\text{NiFe}/(111)\text{IrMn}_3$ ] textures for the Mn inserted total vol of 75.5, 77.5, and 79.3% were about 1.4, 0.8, and 0.6, respectively. For the sample without Mn inserted layer, the  $H_{ex}$  between  $\text{IrMn}$  and  $\text{CoFe}$  layers was almost zero, but it increased to 100 Oe after annealing of 250 °C. For as-grown two multilayers samples with ultra-thin Mn layers of 77.5 and 78.7 vol %, the  $H_{ex}$ s were 259 and 150 Oe, respectively. In case of  $\text{IrMn}$  with 77.5 vol% Mn, the  $H_{ex}$  was increased up to 475 Oe at 350 °C but decreased to 200 Oe at 450 °C, respectively. The magnetic properties and thermal stabilities of  $\text{NiFe}/[\text{IrMn-Mn}]/\text{CoFe}$  multilayer were enhanced with Mn additions. In applications where higher  $H_{ex}$  and  $T_b$  are required, proper contents of Mn can be used.

**Key words :**  $\text{NiFe}/[\text{IrMn-Mn}]/\text{CoFe}$  multilayer, exchange coupling field, Mn content, vol% Mn, thermal stability.