

## Mn-Ir/Ni-Fe 다층막의 하지층과 적층구조에 따른 교환이방성과 미세구조 연구

노재철 · 윤성용 · 이경섭 · 김용성 · 서수정  
성균관대학교 금속공학과, 수원시 440-746

(1999년 5월 21일 받음, 1999년 7월 1일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 마그네트론 스퍼터링 법으로 제작한 Mn-Ir/Ni-Fe/Buffer/Si 다층막에서 다양한 하지층과 적층구조에 따른 교환이방성과 미세구조에 대하여 고찰하였다. Ni-Fe 위에 Mn-Ir을 증착한 Top 구조의 경우에는 (111) 우선방위에 상관 없이 165 Oe 이상의 높은  $H_{ex}$  값을 얻을 수 있었다. 또한 Mn-Ir/Ni-Fe의 미세구조와 교환이방성에 대하여 고찰한 결과 높은  $H_{ex}$ 가 발생한 시편은 Mn-Ir/Ni-Fe 계면에서 grain-to-grain epitaxy가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 Mn-Ir/Ni-Fe 다층막의  $H_{ex}$ 는 Mn-Ir/Ni-Fe 계면에서의 Mn-Ir의 결정립 크기와 grain-to-grain epitaxy에 의존하며  $H_c$ 는 Mn-Ir/Ni-Fe의 계면저철기에 의존한다는 것을 알 수 있었다.

### I. 서 론

최근에 고밀도 자기기록매체의 재생소자나, 자기센서로서 거대자기저항(GMR)소자[1]가 큰 관심을 받고 있다. 그 중 스핀밸브형 거대자기저항소자는 우수한 민감도로 인해 큰 실용 가능성이 기대된다. 스핀밸브형 거대자기저항소자는 반강자성/강자성층의 이층막에서 발생하는 교환이방성 효과를 이용함으로써 거대자기저항 현상[2]이 나타나게 된다. 따라서 반강자성층과 강자성층을 이용한 교환결합 다층막에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 그 중에서도 Mn-Ir/Ni-Fe는 높은 교환이방성과 높은 Neel 온도[3, 4], 우수한 내식성[5, 6]을 갖고 있기 때문에 스핀밸브에 응용될 수 있는 유력한 후보로 알려져 있다. 한편, Mn-Ir 계 합금은 반강자성 특성을 나타내기 위해서는  $\gamma$ -Mn-Ir 상을 유지해야 하는데 이 상은 하지층의 종류에 따라 미세구조가 민감하게 변화하기 때문에 하지층의 의존성에 대한 연구가 요구된다. 그러나 현재까지는 하지층에 대한 연구가 많이 진행되고 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 하지층으로 FCC(Cu, Ag), BCC(Ta), HCP(Ti, Zr)의 구조를 갖는 재료를 선택하고 이것을 Mn-Ir/Ni-Fe의 하지층으로 사용하여 교환이방성과 미세구조의 변화를 고찰하였다.

### II. 실험방법

D.C magnetron sputtering법을 이용하여 Si(100) 기판 위에 Mn-Ir/Ni-Fe 다층박막을 증착하였다. Mn-Ir 박막의

조성은 Mn target 위에 Ir chip을 사용하여 Mn-21 at% Ir를 유지하고 Ni-Fe는 Ni-19 wt% Fe의 타겟을 사용하여 일정한 조성을 얻었다. 초기진공도는  $1.0 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 유지하고, 기판의 온도는 상온으로 고정하였다. 이때 Ar 압력과 증착 power는 각각 4 mTorr와 40 W로 유지하고, 시편의 자기적 이방화를 위해서 증착과정 중에 영구자석을 이용해 300 Oe의 자기장을 인가하였다.

Ni-Fe 층 위에 Mn-Ir을 증착한 경우인 Mn-Ir/Ni-Fe/Buffer(no, Cu, Ag, Zr, Ta, Ti)/Si을 Top 구조라 칭하고 Mn-Ir 위에 Ni-Fe을 증착한 경우인 Ni-Fe/Mn-Ir/Buffer(no, Cu, Ag, Zr, Ta, Ti)/Si을 Bottom 구조로 칭하였다.

증착막의 두께는 mechanical stylus 법을 이용하는 Dektak 3030으로 측정하였으며, 이를 이용해 증착속도를 결정하였다. 자기적 특성의 분석은 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하였으며, 미세구조에 대한 분석은 Cu  $K_{\alpha 1}$ 의 XRD(X-Ray Diffractometer)와 HRTEM (High Resolution Transmission Electron Microscopy)을 이용하였다. 조성분석은 RBS(Rutherford Back-scattering Spectrometry)와 EPMA(Electron Probe Microscopy Analysis)를 이용하였다.

### III. 실험결과

#### 3.1 자기적 특성

Ta(5 nm)/Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/buffer(5 nm)/Si와 Ta(5 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/buffer(5 nm)/Si의 다층막의 자기이력곡선과  $H_{ex}$ 와  $H_c$  값을 Fig. 1에 나

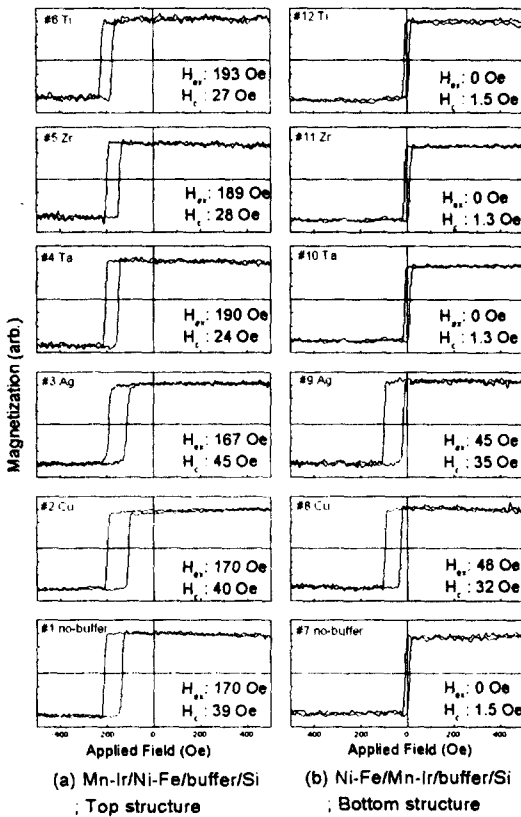


Fig. 1. Magnetization curves of Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/buffer(5 nm)/Si and Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/buffer(5 nm)/Si multilayers, shown the  $H_{ex}$  and  $H_c$  in (a) and (b), respectively.

타내었다. 먼저  $H_{ex}$  값을 고찰하면, Ni-Fe 위에 Mn-Ir을 증착한 Top 구조의 경우에는 하지층의 종류에 관계 없이 165 Oe 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 반면에 Bottom 구조의 경우에는 대부분의 경우에 교환이방성을 나타내지 않거나 FCC의 하지층(Cu, Ag)을 사용한 경우에만 50 Oe 이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 즉 Top 구조에서 우수한 교환이방성을 나타내고 있고, 또한 FCC(Ni-Fe, Cu, Ag)의 위에 Mn-Ir을 증착한 경우에만 교환이방성이 발생한다는 것을 알 수 있다.

한편  $H_c$  값을 고찰하면, 교환이방성을 나타내는 시편의 경우에는 25 Oe 이상을 나타내고 있으나 교환이방성을 나타내지 않는 시편의 경우에는 2 Oe 이하로 Ni-Fe 박막이 단독으로 증착된 것과 같은 값을 나타내고 있다.

### 3.2 XRD의 고찰

Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/buffer(5 nm)/Si와 Ni-Fe

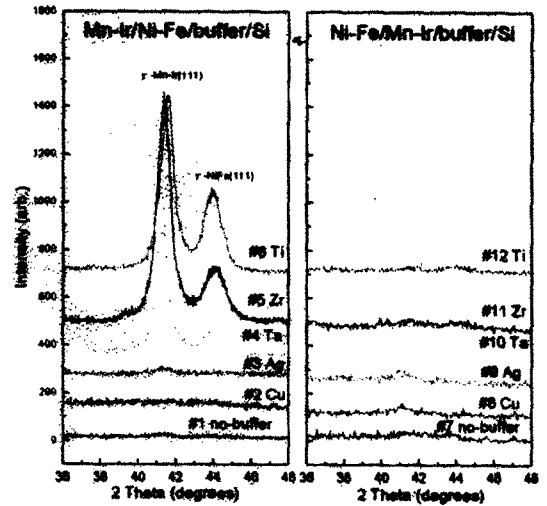


Fig. 2. The XRD patterns of Top and Bottom structure with various buffer layers.

(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/buffer(5 nm)/Si의 다층막의  $\theta/2\theta$  방식으로 얻은 XRD pattern을 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 Top 구조의 Zr과 Ta, Ti을 하지층으로 사용한 경우에는 Mn-Ir와 Ni-Fe의 (111) 면의 회절선이  $41.5^\circ$ 와  $44^\circ$  부근에서 뚜렷하게 나타나고 있으나, 하지층이 없는 경우와 Cu와 Ag를 하지층으로 사용한 경우에는 뚜렷한 회절선이 나타나지 않고 있다. 이것은 Zr과 Ta, Ti을 하지층으로 증착한 경우에 (111) 우선방위를 나타내는 것을 의미한다. 한편 우선방위가 없는 시편은 시료의 두께가 너무 얇기 때문에 회절선이 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

Bottom 구조의 경우에는 모든 시편에서 뚜렷한 회절선을 관찰할 수 없었다. 즉 Bottom 구조의 모든 시편은 어떠한 우선방위도 갖지 않는 것을 의미한다. 한편 Cu나 Ag의 경우에는 다른 시편에 비해 다소 높은 강도의 Mn-Ir와 Ni-Fe의 (111)면의 회절선이 나타나고 있으며 이것은 다른 시편에 비해 결정립의 크기가 다소 크기 때문으로 사료된다.

### 3.3 TEM의 고찰

교환이방성과 미세구조의 관계를 고찰하기 위해 네 가지 시편을 선택하여 HRTEM으로 분석하였다. 3.1절의 결과에서 교환결합을 나타내는 시편과 교환결합을 나타내지 않는 시편으로 크게 두 종류로 분류할 수 있으며 이 두 종류를 다시 우선방위에 따라 분류할 수 있다. 우선방위는 없지만 높은  $H_{ex}$ 를 나타내는 시편(#1)과 (111) 우선방위와 높은  $H_{ex}$ 를 갖는 시편(#5), 우선방위는 없지만 비교적 낮

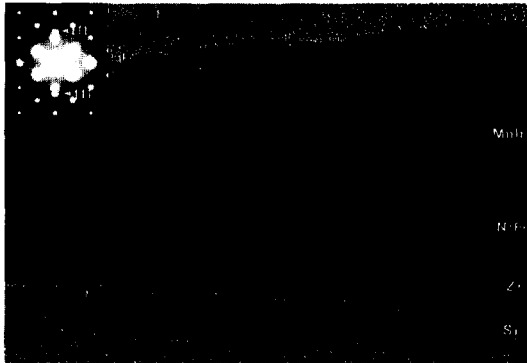


Photo 1. Cross-sectional HRTEM micrographs of Mn-Ir(20 nm)/NiFe(10 nm)/Zr(5 nm)/Si multilayers.

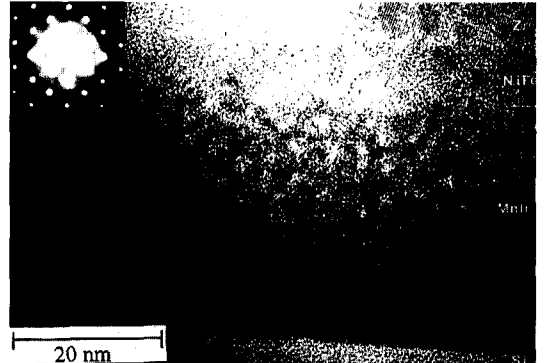


Photo 4. Cross-sectional HRTEM micrograph of Zr(5 nm)/NiFe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/Si multilayers.

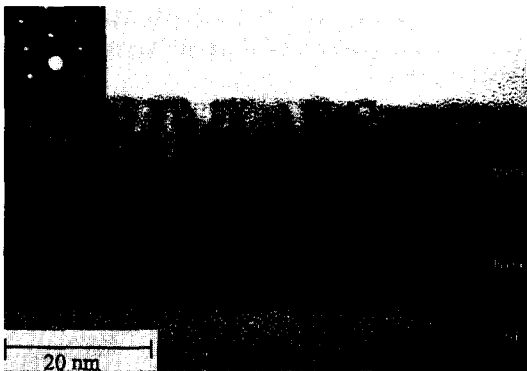


Photo 2. Cross-sectional HRTEM micrograph of Mn-Ir(20 nm)/NiFe(10 nm)/Si multilayers.



Photo 3. Cross-sectional HRTEM micrograph of Mn-Ir(20 nm)/NiFe(10 nm)/Cu(5 nm)/Si multilayers.

은  $H_{ex}$  를 갖는 시편(#8), 우선방위도 없고 교환이방성 특성도 갖고 있지 않는 시편(#7)을 선택하여 미세구조를 분석하였다. 이 때 Ni-Fe 층이 외부로 노출되는 경우 (Bottom 구조)에는 산화를 방지하기 위해 Ta와 Zr을

capping 층으로 증착하였다. Photo 1, 2, 3, 4은 시편 #1, #5, #8, #7의 제한시야 회절도형(Selected Area Diffraction Pattern; SADP)과 단면의 high resolution TEM 사진을 나타낸 것이다.

Photo 1에 따르면 Mn-Ir/Ni-Fe/Si(#1)의 SADP에서 Si 기판에 의한 회절 도형과  $\gamma$ -Ni-Fe와  $\gamma$ -Mn-Ir의 (111) 면의 ring pattern이 나타나고 있으며  $\gamma$ -Ni-Fe와  $\gamma$ -Mn-Ir의 격자 상수가 비슷하기 때문에 하나의 ring pattern으로 나타나고 있다. 또한 Ni-Fe/Mn-Ir의 두께가 Si 기판에 비해 매우 얇기 때문에 (111) 면 외의 다른 회절선은 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 단면사진에서의 Ni-Fe 결정립은 등축의 형상이고 결정립의 크기는 6~8.5 nm이며 결정립들은 무질서한 방위를 나타내고 있다. Mn-Ir/Ni-Fe 계면에서의 Mn-Ir 결정립은 7.5~10 nm의 등축의 형상을 나타내고 있으나 증착이 진행되면서 점차 주상정조직으로 바뀌면서 결정립의 크기가 8~11 nm으로 커진다. 결정립간에 방위는 전체적으로 불규칙하고 무질서한 방위를 갖고 있다. 그리고 Ni-Fe/Mn-Ir 계면에서 격자 줄무늬(lattice fringe)가 연속적으로 연결된 것으로 보아 Mn-Ir 결정립과 Ni-Fe 결정립 간에 grain-to-grain epitaxy 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 결정립 크기는 오차를 줄이기 위해 5~8 부위의 각각의 고분해능 사진에서 5~8 개의 결정립 크기를 측정하여 결정립의 크기를 결정하였다.

Photo 2는 Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Zr(5 nm)/Si(#5)의 단면 사진과 제한시야 회절패턴을 나타낸 그림이다. 회절 패턴에서 Mn-Ir와 Ni-Fe의 (111)면에 대한 회절 spot이 Si의 (100)와 (-100)면의 회절 spot의 직상과 직하에 나타난 것으로 보아 Si 기판의 수직방향으로 Mn-Ir/Ni-Fe의 (111)면이 우선적으로 성장된다는 것을 알 수 있다. 단

면사진을 보면 Zr 층은 미세한 결정립과 비정질이 혼재되어 있으며 Ni-Fe 층은 결정립의 높이가 막 두께와 같은 ~10 nm이고 직경이 9~11 nm의 주상정을 갖는 주상정구조를 나타내고 있다. Mn-Ir 층은 결정립의 직경과 높이가 각각 9~15 nm와 9~11.5 nm의 주상정구조를 나타내고 있다. 또한 Ni-Fe/Mn-Ir 계면에서 격자 줄무늬(lattice fringe)가 연속적으로 연결된 것으로 보아 Mn-Ir 결정립과 Ni-Fe 결정립 간에 grain-to-grain epitaxy 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

Photo 3은 Ni-Fe/Mn-Ir/Cu/Si(#8)의 미세구조를 HRTEM으로 관찰한 사진과 SADP를 나타내고 있다. SADP의 ring pattern에 의해 random structure를 갖고 있는 것을 알 수 있다. Ni-Fe 막은 완전한 주상정 구조를 갖고 있으며 결정립의 높이는 ~9.5 nm이고 직경은 9~11 nm이다. Mn-Ir 결정립은 약간의 주상정 구조를 갖고 있으며 결정립의 높이는 7.5~11 nm이고 직경은 5.5~11 nm이다. 또한 Ni-Fe/Mn-Ir 계면과 Mn-Ir/Cu 계면에서 grain-to-grain epitaxy 성장을 확인할 수 있다. 한편 Ni-Fe/Mn-Ir 계면과 박막의 표면은 다른 시편에 비해 평평하지 않고 굴곡을 나타내고 있다.

Zr/Ni-Fe/Mn-Ir/Si(#7)의 미세구조와 SADP는 Photo 4에 나타내었다. SADP에서는 Ni-Fe/Mn-Ir이 random orientation 구조를 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 고분해능 TEM 사진에 의하면 Ni-Fe 막은 완전한 주상 구조로 결정립의 높이는 ~10 nm이고 직경은 6~9 nm이었다. Mn-Ir 막은 결정립이 등축의 모양이고 결정립간에 방위는 무질서하게 배열되어 있으며 결정립의 크기는 2~3.5 nm이다. 또한 Ni-Fe/Mn-Ir 계면에서 epitaxy의 증거를 관찰할 수 없었다.

### 3.4 AFM의 고찰

Table II에는 시편 #1, 2, 4, 5, 7, 8, 10에 대한 AFM 분석결과를 나타내었다. 이때 RMS 거칠기와 peak-to-valley 값은 시편의  $0.8 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ 의 표면에 대한 결과이

다. 이 때 peak-to-valley 값은 요철부위와 다른 요철부위와의 평균거리를 의미한다. Cu를 하지층으로 사용한 시편(#2, 8)의 RMS 거칠기는 각각 0.27 nm와 0.25 nm이고 peak-to-valley 값은 각각 3.2 nm와 4.0 nm이다. 반면에 Cu를 하지층으로 사용하지 않은 시편은 Cu를 하지층으로 사용한 경우에 비해 상당히 낮은 RMS 거칠기와 peak-to-valley 값을 나타내고 있다. 이는 Cu의 경우에는 다른 하지층에 비해 초기성장시 섬(island)성장 형태를 이루기 때문인 것으로 사료된다. Cu를 하지층으로 증착한 시편의 경우에 비해 다른 시편의 표면 조도가 더욱 우수하다는 것을 알 수 있다.

## IV. 논 의

앞 절에서의 교환이방성과 미세구조에 대한 분석 결과를 토대로 하여 결정립의 크기와 계면 거칠기 및 우선방위에 따른 교환이방성의 변화를 해석하고자 하였다.

먼저 우선방위에 따른 교환이방성의 변화를 고찰하면, XRD와 TEM의 SADP에서 얻은 결과에서의 같이 Zr과 Ta, Ti를 하지층으로 증착한 Top 구조의 시편에서만 (111) 우선방위가 발견되고 있으며 그 외의 경우에는 (111) 우선방위는 관찰되지 않고 있다. 그러나 Top 구조의 경우에는 우선방위의 유·무에 관계없이 모든 시편에서 165 Oe 이상의 높은  $H_{ex}$ 를 나타내고 있으며 또한 Bottom의 구조에서는 모든 시편에서 (111) 우선방위를 갖고 있지 않지만 Cu와 Ag의 하지층을 사용한 경우에는 교환이방성을 나타내고 있다. 따라서 이러한 결과에 의하면 Mn-Ir/Ni-Fe의 (111) 우선방위는  $H_{ex}$ 에 거의 영향을 주지 않는 것으로 결론 내릴 수 있다. Mn-Ir/Ni-Fe의 교환이방성은 (111) 우선방위가 없는 경우에도 발생한다는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Mn-Ir/Ni-Fe의 교환이방성은 (111) 우선방위에 의존한다는 기존의 보고[7, 8]와는 다른 결과이다.

두 번째로 계면거칠기에 따른 교환이방성을 살펴보자.

Table I. The variations of roughness and peak-to-valley of Mn-Ir contained multilayers

sample number		stacking structure	RMS roughness (nm)	peak-to-valley (nm)
Top Structure	#1	Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Si	0.189	1.61
	#2	Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Cu(5 nm)/Si	0.267	3.22
	#4	Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Ta(5 nm)/Si	0.174	1.36
	#5	Mn-Ir(20 nm)/Ni-Fe(10 nm)/Zr(5 nm)/Si	0.135	0.97
Bottom Structure	#7	Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/Si	0.163	1.52
	#8	Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/Cu(5 nm)/Si	0.248	4.0
	#10	Ni-Fe(10 nm)/Mn-Ir(20 nm)/Ta(5 nm)/Si	0.191	1.85

Mn-Ir 교환이방성 다층막의 RMS 거칠기에 따른  $H_{ex}$ 의 변화를 조사하면  $H_{ex}$ 와 거칠기와의 어떠한 의존성도 발견할 수 없다. Cu 하지층을 사용한 두 시편(#2, #8)의 RMS 거칠기 값은 약 0.25 nm로 유사한 거칠기를 나타내지만 시편 #2의  $H_{ex}$ 의 값은 시편 #8에 비해 거의 세 배의 높은 값을 갖고 있다. 또한 그 외의 시편의 경우에도 유사한 거칠기를 갖고 있지만  $H_{ex}$ 는 제 각각 다른 값을 나타내고 있다. 따라서 Mn-Ir 다층막의  $H_{ex}$ 는 계면 거칠기와 관계가 없는 것으로 사료된다. 그러나  $H_{ex}$ 는 계면거칠기가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. Neel의 orange peel 모델[9]에 따르면 거칠 계면은 계면에서의 쌍극자 상호작용에 의해 국부자장(local field)이 발생하게 된다. 이러한 국부자장은 강자성층의 자화반전을 어렵게 만들며 이로 인해 보자력의 증가를 초래하게 된다. 거칠기(RMS roughness)가 이 증가하고 굴곡의 간격(peak-to-valley)이 감소하게 되면 국부자장의 크기가 증가하게 되므로 이러한 계면의 거칠기는 보자력의 증가에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 Ta와 Zr 또는 Ti 위에 Ni-Fe를 증착하면 표면거칠기의 감소에 의해[10] 보자력이 감소하게 될 것이다.

또한 교환이방성 현상을 나타내는 시편은 모두 Mn-Ir/Ni-Fe의 계면에서 grain-to-grain epitaxy 관계를 나타내고 있으나(Photo 1, 2, 3) 교환이방성 현상이 나타나지 않는 시편(Photo 4)은 Ni-Fe 층과 Mn-Ir 층이 연속적이지 못하고 불연속적으로 성장하는 모습을 나타내고 있다. 일반적으로 교환이방성은 강자성체와 반강자성체의 계면에서 발생하기 때문에 계면에서 epitaxy 구조를 이루게 되면 교환이방성의 효율이 증가할 수 있을 것으로 생각할 수 있다. 이와 같이 교환이방성이 발생하는 반강자성/강자성 이층막의 계면은 대부분 grain-to-grain epitaxy가 있다고 보고되고 있다. 현재 Fe-Mn/Ni-Fe[11]와 NiMn/Ni-Fe[12], Ni-Fe/NiO[13]의 경우에도 계면에서 grain-to-grain epitaxy가 나타난다고 보고되고 있으며, 본 논문에서의 Mn-Ir/Ni-Fe의 경우에도 epitaxy관계를 가질 것으로 예상할 수 있다.

끝으로 Mn-Ir의 결정립 크기에 따른  $H_{ex}$ 의 변화를 고찰하면 다음과 같다. Mn-Ir/Ni-Fe의 계면에서의 Mn-Ir 결정립의 크기를 살펴보면 시편 #1의 경우는 7.5~10 nm의 등축상의 결정이며 #5는 높이와 직경이 각각 7~15 nm와 9~11.5 nm이고 #8은 높이가 7.5~11 nm와 직경이 5.5~11 nm인 주상의 결정립을 갖고 있다. 또한 #7의 시편은 2~3.5 nm의 Mn-Ir 결정립을 갖고 있다.

이와 같이 Mn-Ir의 결정립 크기에 따른 교환이방성의 변화를 설명하기 위해 다른 연구자들의 이론을 도입하여 해석하고자 하였다. 반강자성체의 결정립 크기와 교환이방성과의 관계에 대한 많은 연구에 의해 여러 가지 이론과 해석이 발표되었다[14-16]. Tsang의 국부교환인자의 분포(local exchange component distribution)에 대한 이론[14]과 Meiklejohn과 Lin의 결정자기 이방성과 결정립 크기에 관한 이론[15, 16] 등을 종합하여 요약하면 다음과 같다. 강자성체와 강자성체와 접하는 반강자성체의 결정립들은 각각  $H_{ex}$ 와  $H_c$ , Blocking 온도( $T_b$ )에 기여하기 때문에 교환결합 이층막의 전체의  $H_{ex}$ 와  $H_c$ ,  $T_b$ 는 강자성체와 그와 결합하고 있는 반강자성체의 결정립들의 교환결합에 대한 기여를 모두 합한 값으로 결정된다. 이때 강자성체와 인접하지 않은 결정립들은 교환결합특성에 아무런 영향을 미치지 않으며 단지 강자성체와 인접한 반강자성체의 결정립만이 교환이방성에 영향을 미친다. 이 때 강자성체와 인접하고 있는 결정립의 크기에 따라 교환이방성에 미치는 영향을 크게 3가지로 분류할 수 있다. 반강자성체의 결정립의 크기가 ①  $kT/K_{AFI}$  ( $k$  = Boltzmann 상수,  $T$  = 절대온도,  $K_{AFI}$  = 단위부피당 반강자성체의 이방성 에너지)보다 더 작을 때는 초상자성 특성을 나타내므로  $H_{ex}$ 와  $H_c$ 에 모두 영향을 주지 않는다. ②  $kT/K_{AFI}$  보다는 크고  $J_K A/K_{AFI}$  ( $J_K$  = 반강자성체/강자성체 계면에서의 교환결합 에너지,  $A$  = Ni-Fe막과 접촉하고 있는 반강자성 입자의 계면의 면적) 보다는 작은 크기의 반강자성 입자는 자화반전에 의해 자화방향이 회전할 때 강자성체와 동시에 반강자성체의 스핀을 회전시키는 것이 에너지적으로 안정하기 때문에  $H_{ex}$ 는 증가시키지만  $H_c$ 에는 영향을 주지 못한다. ③  $J_K A/K_{AFI}$ 보다 큰 부피를 갖는 반강자성 입자는  $H_{ex}$ 의 증가에 기여한다. 따라서 만약 강자성체와 접하는 결정립의 크기가 모두  $J_K A/K_{AFI}$ 보다 클 때 가장 높은  $H_{ex}$ 를 얻을 수 있다.

따라서 시편 #7이 교환이방성 특성을 나타내지 않는 것은 Mn-Ir의 결정립 크기가  $kT/K_{AFI}$  보다 더 작아  $H_{ex}$ 에 영향을 주지 않기 때문이다. 반면에 #1과 #5, #8의 경우에는  $J_K A/K_{AFI}$  보다 더 큰 부피의 Mn-Ir 입자를 갖고 있기 때문에 교환이방성 현상을 띄게 되는 것이다. 또한 시편 #1과 #5에 비해 시편 #7은 비교적 낮은  $H_{ex}$ 와 높은  $H_c$ 를 나타내고 있는 것은 시편 #7에는 ②와 ③에 해당하는 크기의 결정립이 동시에 존재하기 때문이다. HRTEM의 결과에서도 나타나 듯이 시편 #8은 직경 7~11 nm의 결정립과 더불어 5.5~7 nm의 결정립도 갖고 있다. 따라서

$J_{KA}/K_{AFI}$  보다 큰 결정립은  $H_{ex}$ 에 기여를 하지만  $J_{KA}/K_{AFI}$  이하의 작은 결정립이  $H_{ex}$ 에는 기여하지 않고  $H_c$  값을 증가시키기 때문에 시편 #1, #5에 비해 낮은  $H_{ex}$ 와 높은  $H_c$  값을 나타낸 것으로 사료된다.

또한 Top 구조에서 Ta(#4)과 Zr(#5), Ti(#6)의 삽입에 의해 약 20 Oe의  $H_{ex}$ 의 증가가 나타나고 있으며 이것은 (111) 우선방위의 증가에 의한 것보다 Mn-Ir의 결정립 크기의 증가와 epitaxy의 향상에 의한 것으로 사료된다. Mn-Ir은 Ni-Fe와 같은 구조를 갖고 있으며 격자의 크기가 비슷하기 때문에 Ni-Fe와 Mn-Ir 모두 (111) 우선방위가 발생하는 경우에 두 결정립간에 epitaxy를 이루기가 쉽게 된다. 즉 Ta이나 Zr의 하지층을 사용한 경우에 그 위에 증착되는 Ni-Fe 막의 결정립 크기의 증가와 더불어 (111) 우선방위를 갖기 때문에 Ni-Fe 위에 증착되는 Mn-Ir의 결정립 크기의 증가와 Ni-Fe와 Mn-Ir 간의 epitaxy를 증가시키기 때문에  $H_{ex}$ 를 향상시킬 수 있는 것으로 사료된다. 또한 Zr 층을 사용한 시편에서의 Mn-Ir의 결정립 크기는 하지층을 사용하지 않은 경우에 비해 더 크다는 것은 Photo 4-1(a)의 TEM 결과에서도 나타나 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 Mn-Ir/Ni-Fe/Buffer(no, Cu, Ag, Zr, Ta, Ti)의 교환결합 다층박막에 있어서 다양한 하지층과 적층구조에 따른 교환이방성의 변화를 고찰하여 그 결과를 미세구조와 관련지어 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ni-Fe 위에 Mn-Ir를 증착한 Top 구조인 경우에는 모든 하지층에서 우수한 교환이방성 특성을 얻었다. 반면에 Bottom 구조의 경우에는 FCC 하지층(Cu, Ag)을 사용한 경우에만 교환이방성을 얻을 수 있었으며 Cu와 Ag의 하지층의 경우에도 Top 구조에 비해 비교적 낮은  $H_{ex}$ 와 높은  $H_c$  값을 나타내고 있다.
2. Mn-Ir의 결정립을 성장시키기 위해서는 FCC의 하지층 위에 증착해야함을 알 수 있었다.
3. Mn-Ir/Ni-Fe의 (111) 우선방위와 계면거칠기는 교환

이방성의 특성에 관련이 없다는 결론을 얻을 수 있었다.

4. 교환이방성을 나타내는 시편의 Mn-Ir/Ni-Fe 계면에서 grain-to-grain epitaxy를 고찰할 수 있었다.
5. Mn-Ir 교환결합형 다층막의 교환이방성 특성은 강자성체와 인접하는 계면에서의 Mn-Ir의 결정립 크기에 좌우된다. 높은  $H_{ex}$ 를 나타낼 경우의 Mn-Ir 결정립의 크기는 6 nm 이상이고  $H_{ex}$ 가 나타나지 않는 경우의 Mn-Ir 결정립의 크기는 3.5 nm 이하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgrt, J. Appl. Phys., **69**, 4774 (1991).
- [2] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Petroff, Phys. Rev. Lett., **61**, 2472 (1988).
- [3] T. Yamaoka, M. Mekata and H. Takaki, Jpn. J. phys. Soc., **31**, 301 (1971).
- [4] Takashi Yamaoka, Jpn. J. Phys. Soc., **36**, 445 (1974).
- [5] H. N. Fuke and Y. Kamiguch, Jpn. J. Appl. Magn. Soc., **22**, 58 (1998).
- [6] H. N. Fuke, K. Saito, Y. Kamiguchi, H. Iwasaki, and M. Sahashi, J. Appl. Phys., **81**, 4004 (1997)
- [7] K. Hoshino, R. Nakatani, H. Hoshiya, Y. Sugita, and S. Tsunashima, Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 607 (1996).
- [8] R. Nakatani, H. Hoshiya, K. Hoshino, and Y. Sugita, IEEE. Tran. Mag., **33**, 3682 (1997).
- [9] L. Neel, C. R. Acad. Sci., **255**, 1676 (1962).
- [10] Jae-Chul Ro, PhD thesis, SungKyunKwan Univ, (1998) p. 168.
- [11] S. X. Wang, W. E. Bailey and C. Surgers, IEEE. Tran. Mag., **33**(3), 2369 (1997).
- [12] K. Uneyama, M. Tsunoda and M. Takahashi, IEEE. Tran. Mag., **33**, 3685 (1997).
- [13] J. C. Ro, D. H. Lee, S. J. Suh, J. Magn. Soc. Japan, **23**, 167 (1999).
- [14] C. Tsang and Kenneth Lee, J. Appl. Phys., **53**(3), 2605 (1982).
- [15] W. H. Meiklejohn, J. Appl. Phys., Suppl., **33**(3), 1328 (1962).
- [16] T. Lin, C. Tsang, R. E. Fontana and J. K. Howard, IEEE. Tran. Mag., **31**(6), 2585 (1995).

## **The Exchange Anisotropy and Microstructure of Mn-Ir/Ni-Fe Multilayers with Various Buffer Layer Materials and Stacking Structures**

**J. C. Ro, S. Y. Yoon, K. S. Lee, Y. S. Kim and S. J. Suh**

*Department of Metallurgical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea*

(Received 21 May 1999, in final form 1 July 1999)

The magnetic properties and the microstructures of the Mn-Ir/Ni-Fe multilayers with various stacking structures and buffer layer materials have been investigated. The (111) texture of Mn-Ir/Ni-Fe was observed in the top structures with Ta, Zr, or Ti buffer materials. However, all Mn-Ir/Ni-Fe multilayers with top structures exhibit high  $H_{ex}$ , regardless of the (111) preferred orientation of Mn-Ir film. The samples whose high  $H_{ex}$  observed grain-to-grain epitaxial tendency and the large grain of Mn-Ir film at the interface. It can be explained that the  $H_{ex}$  does not depend on the (111) texture of the Mn-Ir film and the interface roughness, but depends on the grain size of the Mn-Ir film and the morphology of the interface between the Mn-Ir and the Ni-Fe grains, and the  $H_c$  depends on the the interface roughness between the Mn-Ir and the Ni-Fe films.