

## NiO 스핀밸브 박막에서 교환결합과 사잇층 결합에 관한 연구

박창만 · 고성호 · 황도근\* · 이상석\* · 이기암

단국대학교 자연과학대학 물리학과

충남 천안시 안서동 산 29번지, 330-714

\* 상지대학교 이공과대학 물리학과

강원도 원주시 우산동 산 41, 220-702

(1997년 8월 21일 받음, 1997년 9월 15일 최종수정본 받음)

DC / RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Corning glass 위에 증착된 NiO / NiFe / Cu / NiFe 스핀밸브 박막에서 반강자성체 NiO와 강자성층 NiFe 사이의 교환결합력( $H_{ex}$ )과 보자력( $H_c$ ), 그리고 두 NiFe 강자성층간의 사잇층 결합력( $H_{int}$ )에 대해 고찰하였다. 사잇층 Cu의 두께증가에 따라 자성층간의  $H_{int}$ 는 서서히 감소하였고,  $H_{ex}$ 는 거의 90 Oe로 일정한 값을 보였다. NiO와 교환 결합한 NiFe의 두께증가에 따라  $H_{ex}$ 는 감소하였으나,  $H_{int}$ 는 80 Oe까지 유지하다 감소하였다. 또한 NiO와 교환 결합되지 않은 NiFe 자성층의 두께 증가에 따라서는  $H_{ex}$ 의 값이 거의 변화하지 않았고,  $H_{int}$ 는 두께에 따라 서서히 증가하는 결과를 보였다.

### I. 서 론

다층박막에서의 거대자기저항현상(Giant Magnetoresistance)은 그들의 소자응용시 큰 포화자장값과 자성층의 자구벽 이동에 의한 Barkhausen jump 잡음 등의 문제점을 안고 있어, 최근 반강자성층을 이용한 스핀밸브(spin-valves) 삼층박막의 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2]. 이때 반강자성체와 강자성체의 계면에서 강한 일축이방성 교환결합(anisotropic exchange coupling)이 유도되어 자성층의 자구를 안정화시킴으로써 이러한 단점을 최소화시킬 수 있다[3-4]. 또한 교환 결합된 스핀밸브 박막은 낮은 자기장에서 step 형태의 자기저항 변화를 유도함으로써 자기센서로서의 실용성에 많은 관심과 연구가 진행되고 있다[5, 6].

반강자성체로는 지금까지 주로 FeMn이 사용되었으나, FeMn은 열적불안정성과 상온에서의 부식, 여러 상(phase)의 존재, 그리고 낮은 blocking 온도 등에 의한 공정상의 난점 등을 가지고 있다. 따라서 결정학적으로 간단하고, 스핀구조도 단순하여 화학적으로 매우 안정된 NiO 등이 최근에 연구되고 있다[7-8]. NiO는 NaCl 구조를 가지며 {111}면을 따라 원자의 스핀이 평행(강자성적)으로 배열되어 있으며, 또한 각각의 {111}면의 스핀 배열은 서로 반평행(반강자성적) 배열을 하고 있고, NiO의 {111}면의 우세한 스핀방향은 <110> 방향이다. 이렇게 성

장된 NiO와 인접한 NiFe 강자성층 사이의 계면에서는 이방성 교환결합이 유도되며, 그 결과로 자기이력곡선의 이동을 유도하여 step 형태의 자기저항곡선을 만든다. 반강자성 NiO를 이용한 스핀밸브 박막의 기본구조는 NiO /  $M_1$  / Cu /  $M_2$ 의 구조를 갖으며, 이때  $M_1$ 과  $M_2$ 는 일반적으로  $Ni_{81}Fe_{19}$ 가 주로 사용되며, 열적 안정성과 자기저항비를 향상시키기 위해 [NiFe / Co]와 NiFeCo가 사용되기도 한다. NiO층과 결합된 강자성층인  $M_1$ 을 보통 "pinned-layer",  $M_2$ 를 "free-layer"라고 한다. 본 논문에서는 편의상  $M_1$ 층을 "제1 자성층",  $M_2$ 층을 "제2 자성층"으로 표시하기로 한다.

반강자성 NiO층과 직접적으로 교환 결합하는 제1 자성층의 자기특성은 자기이력곡선의 이동된 세기를 정의하는 이방성 교환결합력(anisotropic exchange coupling field,  $H_{ex}$ )으로 대변될 수 있다. 자유로운 자화거동을 보이는 제2 자성층은 두 강자성층 사이의 결합력(inter-layer coupling field,  $H_{int}$ )에 의해 영향을 받는다.  $H_{int}$ 가 발생하는 원인으로는 계면의 거칠기에 의해 유도된 정자장(magnetostatic) 에너지의 차이에 따라 생기는 Néel's orange peel coupling과 Cu 사잇층의 Fermi surface에 의존하는 RKKY-like coupling 등의 이론으로 설명되고 있다[9, 10]. 이러한 두 가지 견해는 주로 사잇층인 Cu의 두께와 계면에서의 거칠기에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 특히 계면에서의 거칠기가 약 4 Å

보다 작은 경우 RKKY 교환력에 의한 것이 우세하며, 7 Å보다 클 경우 정자장결합(magnetostatic coupling)에 의한 Néel's 교환력이 우세한 것으로 보고되고 있다[11]. 이렇듯 스핀밸브 박막에서 이방성 교환결합력과 사잇층 교환결합력은 계면 거칠기에 관해서 서로 다른 경향을 보이는 것으로 보고되고 있으며, 각 층의 두께에 따라 서로 다양한 경향을 보이고 있다. 기본적으로 스핀밸브 박막을 응용하는데 있어서 강자성층간의 사잇층 결합력은 약하거나 존재하지 않는 것이 바람직하다.

따라서 본 논문에서는 NiO/NiFe/Cu/NiFe 스핀밸브 박막에서 제 1 자성층, 제 2 자성층, Cu 두께에 따라  $H_{int}$ ,  $H_{ex}$  그리고  $H_c$  와 자기저항비, 결정구조 등의 특성을 고찰해 보고자 한다.

## II. 실험 방법

NiO는 RF(13.56 MHz) 마그네트론 스퍼터링 방법으로, NiFe와 Cu는 DC 스퍼터링 방법으로 Corning #7059 glass 위에 증착하였다. 기초 진공도는  $2.0 \times 10^{-6}$  torr 이었으며, NiO 증착시 Ar gas만을 사용하여  $1.5 \times 10^{-3}$  torr에서 증착하였다. 시편의 일축이방성을 유도하기 위해 영구자석을 이용하여 시편의 중앙에서 약 350 Oe의 자장을 인가하였다. 각 층의 두께는 타겟위에 시편이 머무는 시간과 증착율로 조정하였고, 시편의 고유저항과 시편 크기 효과를 고려하여 모든 시편은 동일한 모양의 mask에 의해 제작되었다.

시편의 제작은 NiO 박막과 NiFe 강자성층 사이의  $H_{ex}$ 의 변화를 조사하기 위하여 glass/NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>tÅ</sub>/Cu<sub>25Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> 스핀밸브 구조에서 제 1 자성층의 두께를 15 Å에서 90 Å까지 변화시켰다. 또한 두 강자성

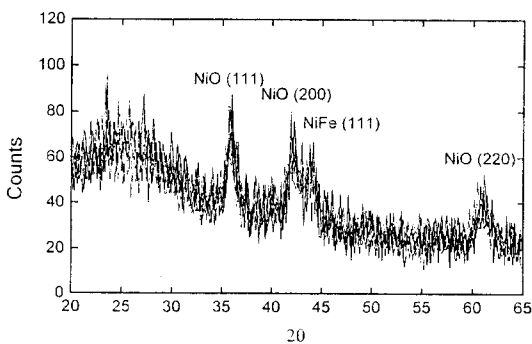


Fig. 1. High angle XRD pattern of NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>25Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> spin valve film.

층 사이의  $H_{int}$ 를 조사하기 위하여 앞의 스핀밸브 구조에서 제 1 자성층을 50 Å으로 고정하고, 제 2 자성층과 Cu층의 두께를 각각 15~90 Å, 그리고 10~60 Å까지 변화하면서 실험하였다.

스핀밸브 박막의 자기이력 특성은 VSM으로 측정하였고, 자기저항은 4-단자 측정법으로 실온에서 측정하였다. 자기저항 측정시 전류와 외부자장의 방향은 수직, 시편의 유도 일축이방성의 방향과 외부자장의 방향은 평행하게 측정하였다. 시편의 결정구조는 Cu-K $\alpha$  X-Ray Diffraction에 의해  $2\theta = 20 \sim 65^\circ$  까지 측정된 결과, Fig. 1과 같이 시편은 모두 다결정구조를 갖고 있으며, NiO(111), (200), 그리고 (220) 등 각 방향이 잘 성장됨을 알 수 있었다. 그러나 이전의 실험을 통하여 이러한 결정배향은 이미 스핀밸브 박막에서의  $H_{ex}$ 와 별 관계가 없음을 확인한 바 있다[12].

## III. 실험결과 및 고찰

최근 들어 양자-통계적인 모델에 의해 삼층박막의 자기저항 현상이 설명되고 있으나[13, 14], 스핀밸브 박막에서의 자기저항현상 역시 다층박막에서의 스핀의존 산란 효과로 설명이 가능하다. 스핀의존산란 효과는 재료의 구성형태에 따라 계면에서의 결정학적 상태와 전자구조의 차이에 의한 계면산란(interface scattering)과 자성층 내부에서 일어나는 부피산란(bulk scattering)으로 구별할 수 있다. [NiFe/Cu] 다층박막의 경우 부피산란의 영향이 훨씬 지배적이다. NiFe 합금의 경우, Fermi 준위에서 빈 상태밀도 차이로 spin-up과 spin-down 전자의 평균자유행로는 약 10배 정도의 산란차이를 보이며, 전도전자의 대부분을 차지하는 spin-up 전자의 이동을 조절하는 자성층의 자화방향의 배열은 전도전자의 산란양에 직접적인 관계를 갖고 있다. 따라서 Cu층을 경계로 한 강자성 NiFe층의 자화방향의 배열은 자기저항비와 매우 밀접한 관계가 있으며, Cu층의 두께에 따른 자화방향의 배열은 자기저항비의 진동현상과 더불어 중요한 사잇층 결합력에 대한 현상으로 지적되고 있다. 따라서 본 논문에서는 사잇층 Cu 두께에 따른 두 자성층의 사잇층 결합력에 대한 접근을 자기저항비의 결과와 연관지어 설명해 보고자 한다.

Fig. 2는 glass/NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>16Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> 시편의 (a) 자화용이축과 (b) 곧란축의 자화곡선을 보여주고 있다. 자화용이축 곡선에 의하면 NiO 반강자성층과 교환 결합한 제 1 자성층에 의해 자화곡선이 중심에서 이동한 것을 알 수 있으며, 교환결합하지 않은 제 2 자

성층은 zero field에서 편향되지 않은 것을 알 수 있다. 이 때 제1자성층의  $H_{ex}$ 는 약 100 Oe정도임을 알 수 있다. 자화 곤란축에 따른 자화곡선은 시편제작시 가해진 외부 자장에 의한 NiFe 층들의 자구회전에 의해 일어나므로 자화용이축 곡선과는 달리 자화곡선의 이동이 나타나지 않고 있다.

또한 [NiO/NiFe] 계면에서의  $H_c$ 는 NiO/NiFe 계면 거칠기에 매우 크게 의존하는 것으로 보고되고 있으나, 거칠기 자체로의 설명보다는 거칠기에 있어서의 기울기 (peak to valley)에 크게 의존하고, 기울기의 증가는 자기극(magnetic pole)을 유도하여 정자장결합을 증대시

키며, 이에 의해  $H_c$ 의 증가를 가져오는 것으로 설명될 수 있다. 그러나 계면에서의 기울기 증가는  $H_{ex}$ 에는 직접적인 영향을 미치지 않으며, 주로 제1자성층 NiFe에서의 자기극을 형성함에 따라 국소적인 탈자장의 생성이  $H_{ex}$ 를 증가시키는 것으로 보고되고 있다. 따라서 이러한  $H_{ex}$ 의 증가의 원인으로는 다결정 NiO 박막에서 작은 수직형 grain의 증가와, NiO/NiFe 계면에서의 접촉면적의 증가를 꼽을 수 있다. 이러한  $H_{ex}$ 의 원인에 대한 설명은 Malozmoff[15]의 random-field 모델로 설명될 수 있다. 스핀터링으로 제작된 다결정 NiO 박막은 수직한 반강자성 자구를 갖게된다. 이때의  $H_{ex}$ 는 단위면적당 평균 random-field energy로부터 생성되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$H_{ex} \propto \frac{\Delta\sigma}{2M_f t_f} \propto \frac{f_i J}{2M_f t_f aL} \quad (1)$$

여기서  $M_f$ 는 자화량을  $t_f$ 는 자성층의 두께를  $f_i$ 는 스핀배열의 무질서도,  $J$ 는 원자의 교환결합력을  $a$ 는 원자간 거리를 그리고  $L$ 는 자구의 크기를 의미한다.

따라서  $H_{ex}$ 는 자구의 크기에 반비례하며, NiO 스핀밸브 박막에서  $H_{ex}$ 의 증가는 grain과 자구 크기의 감소에 의한 것으로 설명되고 있다[16].

Fig. 3은 glass/NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>16Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> 스핀밸브 박막의 자기저항 곡선의 (a) major와 (b) min-

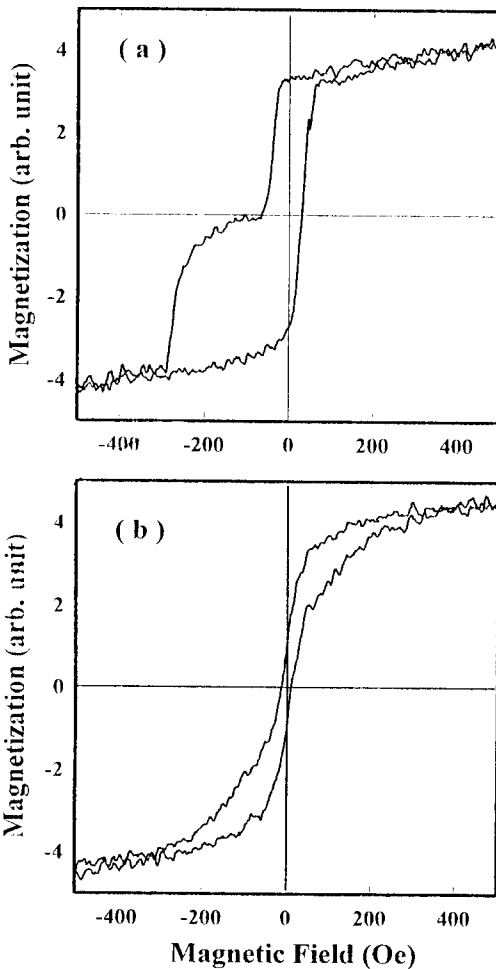


Fig. 2. Magnetization curves of glass/NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>16Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> spin valve films along the (a) easy and (b) hard axis.

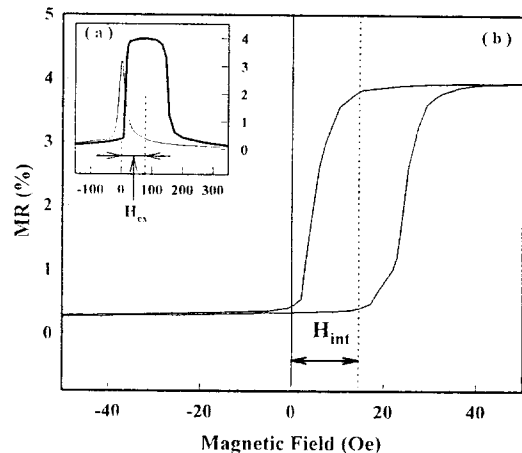


Fig. 3. The (a) major and (b) minor magnetoresistance curves in glass/NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>16Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub> spin valve films. (The quantities  $H_{int}$  and  $H_{ex}$  are defined in the major and minor MR curves.)

or 곡선이다. major 자기저항 곡선은 외부의 자기장을 -150 Oe에서부터 350 Oe까지 변화하여 측정하였고, minor 곡선은 ± 50 Oe에서 측정함으로써 스핀밸브 박막에서 제 2 자성층의 자화변화에 따른 곡선이다. Cu층을 중심으로 분리된 NiFe 강자성층사이의  $H_{int}$ 는 minor 자기저항곡선의 zero field에서 치우친 값으로부터 계산하여 구할 수 있다. Fig. 3-(b)와 같이 minor 곡선으로부터 계산된 사잇층 결합력은 약 17 Oe이며, 이후 Cu층 두께에 따른 자기저항비의 관찰결과 제 1, 2 자성층 사이에 반강자성적인 결합을 보이는 것으로 생각된다.

일반적으로 자화곡선의 포화자화값 측정으로부터 사잇층 Cu에 의해 분리된 NiFe 자성층간의 사잇층 결합력을 구할 수 있는데, 본 실험에서는 그 값이 상당히 작아 Everitt 등의 논문[17]에서와 같이 자기저항 minor 곡선의 원점으로부터 이동된 값을 사잇층 결합력( $H_{int}$ )으로 정의하였다. 이러한 사잇층 결합력은 자화곡선의 자화값으로부터 다음과 같은 수식에 의해 계산될 수 있다.

$$E_z = -J_1 \frac{M_1 \cdot M_2}{|M_1| |M_2|} - J_2 \left( \frac{M_1 \cdot M_2}{|M_1| |M_2|} \right)^2$$

$$= -J_1 \cos(\Delta\Phi) - J_2 (\cos(\Delta\Phi))^2$$

여기서  $E_z$ 는 사잇층 면적당 에너지 밀도를 의미하며,  $\Delta\Phi$ 는 사잇층 양쪽 박막의 자화방향사이의 각도를 의미한다[18].

Fig. 4는 NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>tÅ</sub>/NiFe<sub>60Å</sub> 스핀밸브 박막에서 Cu 두께에 따라 (a) 자기저항비, (b) 사잇층 결합력( $H_{int}$ )과 제 1 자성층의 교환결합력( $H_{ex}$ )을 측정한 결과이다. 최대 자기저항비는 Cu 두께가 16 Å일 때 약 4.7%를 보이나, Cu 두께 24 Å에서 3%로 크게 감소한 후 증가했다 전체적으로 감소하는 양상을 나타낸다. 이는 Hoshiya 등의 결과[19]와 유사하며, 앞서 설명한 바와 같이 스핀밸브 박막과 다층박막에서의 자기저항 효과를 스핀의존산란 현상으로 설명할 수 있다. 즉, Cu에 의해 분리된 NiFe 강자성층의 자화배열이 다층박막에서와 같이 Cu 두께에 따라 주기성을 갖고 반평행이나 평행배열을 함에 따라 자기저항비의 진동현상이 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 다층박막의 경우 수 십층이 교대 적층되어 자기저항비의 진동현상이 주기적으로 뚜렷이 관찰되나, 스핀밸브 박막의 경우 적층 수의 제한과 사잇층이 1층으로만 이루어져 이러한 주기적인 진동이 실질적으로 관찰이 어려운 것으로 생각된다. Hoshiya 등의 결과에서도 다층박막에서 Cu층의 두께에 따른 자기저항비의

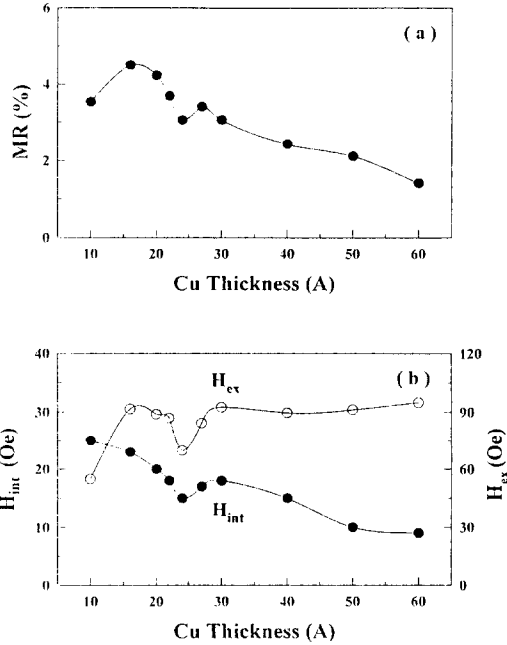


Fig. 4. Dependence of (a) MR ratios, (b)  $H_{int}$  and  $H_{ex}$  on the Cu thickness in NiO<sub>400Å</sub>/NiFe<sub>50Å</sub>/Cu<sub>tÅ</sub>/NiFe<sub>60Å</sub> spin valve films.

진동현상과 같은 자기저항비의 주기적인 진동과 강자성층간의 결합이 강자성적 결합을 나타내는 구간이 존재하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이 결과에서도 스핀밸브 박막에서의 강자성적 결합은 매우 민감한 영역에만 존재하므로 확실한 관찰이 쉽지 않음을 보여주고 있다. Hoshiya 등의 결과에서 Cu 두께 14 Å에서 자기저항비가 감소하는 경향을 보였는데 비해, 본 실험에서는 이보다 두꺼운 영역인 25 Å 구간에서 약간의 자기저항비의 감소가 관찰되었다. 특히 이러한 강자성적 결합을 보이는 경우 zero 자기장에서 저항이 최소를 보이며 이 경우 NiFe 강자성층들은 강자성적으로 결합하는 것으로 보고되고 있다[20]. Hoshiya 등의 결과와 본 실험의 결과가 약 12 Å의 주기를 갖는 [NiFe/Cu] 다층박막에서의 자기저항비의 주기와 일치하는 결과로, Hoshiya 결과는 매우 강한 강자성적 결합을 보이는 Cu 두께가 14 Å인데 비해, 본 실험에서는 두 번째 peak인 25 Å 영역에서 관찰된 것으로 생각된다. Cu 두께 증가에 따른 사잇층 결합력의 단조로운 감소는 강자성층 사이의 거리증가에 따른 정자장 결합력의 감소에 의한 것으로 생각된다. 또한 제 2 자성층의 보자력 측정결과는 Cu의 두께에 크게 의존하지 않는 것은

로 보이며, 대부분의 Cu 두께에 따라 제1자성층의 교환 결합력( $H_{ex}$ )은 약 90 Oe 이상의 값을 가지고 포화되는 결과를 얻을 수 있었다. 자기저항비의 급격한 감소영역에서의  $H_{ex}$ 의 감소를 관찰할 수 있었는데, 이는 결국 자기저항비와 사이트결합력 그리고 제1자성층의 교환결합력 모두 사이트층 두께에 따라 강자성층의 자화량과 자화방향 등에 의해 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 5는  $NiO_{400\text{\AA}}/NiFe_{50\text{\AA}}/Cu_{25\text{\AA}}/NiFe_t\text{\AA}$  ( $t = 15, 30, 45, 60, 75, 90\text{\AA}$ ) 구조에서 제2자성층 즉 free-layer의 두께변화에 따른 (a) 자기저항비와 (b)  $H_{int}$ , 그리고  $H_{ex}$  등의 실험결과이다. 자기저항비는 제2자성층 NiFe 두께 증가에 따라 큰 변화가 없으며,  $H_{int}$ 는 두께증가에 따라 점차 증가하였으며, 이는 (2)식에서와 같이 제2자성층의 두께 증가에 따라 상대적인 자화량의 증가에 의한 것으로 설명할 수 있다. 또한 제1자성층의  $H_{ex}$ 는 제2자성층의 두께증가와 관계없이 약 100 Oe 정도의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 제2자성층의 두께와  $H_{ex}$ 는 무관함을 의미하며, 반강자성체와 강자성체의 교환결합력( $H_{ex}$ )은 상호 계면에서의 특성임을 설명하는 결과이다.

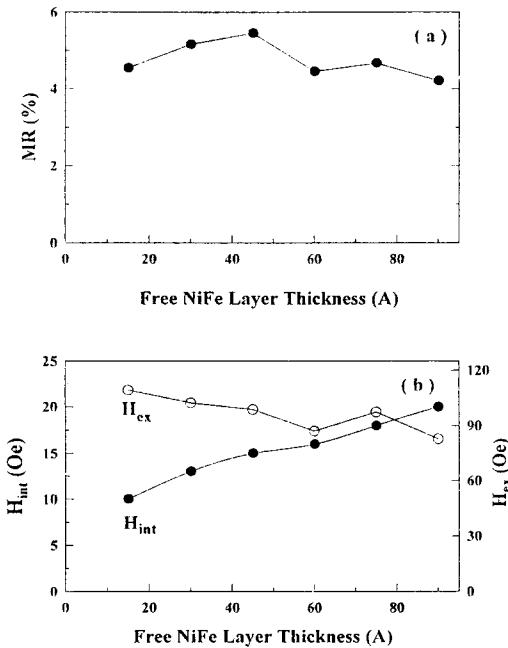


Fig. 5. Dependence of (a) MR ratios, (b)  $H_{int}$  and  $H_{ex}$  on the free NiFe thickness in  $NiO_{400\text{\AA}}/NiFe_{50\text{\AA}}/Cu_{25\text{\AA}}/NiFe_t\text{\AA}$  spin valve films.

Fig. 6은  $NiO$ 와 교환 결합된 제1자성층의 두께변화에 따른 자기저항비 및 자기적 특성 변화를  $NiO_{400\text{\AA}}/NiFe_t\text{\AA}/Cu_{25\text{\AA}}/NiFe_{60\text{\AA}}$  ( $t = 15, 30, 45, 60, 75, 90\text{\AA}$ ) 구조에 대하여 조사한 결과를 보여주고 있다. 최대 자기저항비는 제1 NiFe 자성층의 두께가 45 Å일 때 약 5%의 값을 나타내며, 이후 두께 증가에 따라 약간 감소됨을 알 수 있었다. 이는 스핀의존 산란효과로써 설명할 수 있는데, 자기저항비의 변화가 Fig. 6의 결과와 같이 Cu 사이트층이 고정된 상태에서 자성층의 두께변화에 의해서는 크게 영향을 받지 않는다고 할 수 있다. 그러나  $H_{int}$ 는 평균 23 Oe를 유지하나, 제1자성층의 두께 90 Å이상에서 7 Oe로 급격히 감소하는 결과를 얻었다. 이는 식 (1)과 같이  $NiO/NiFe$  계면의 특성으로 강자성층의 두께 ( $t_f$ )와  $H_{ex}$ 의 반비례관계를 잘 설명하는 결과이다.

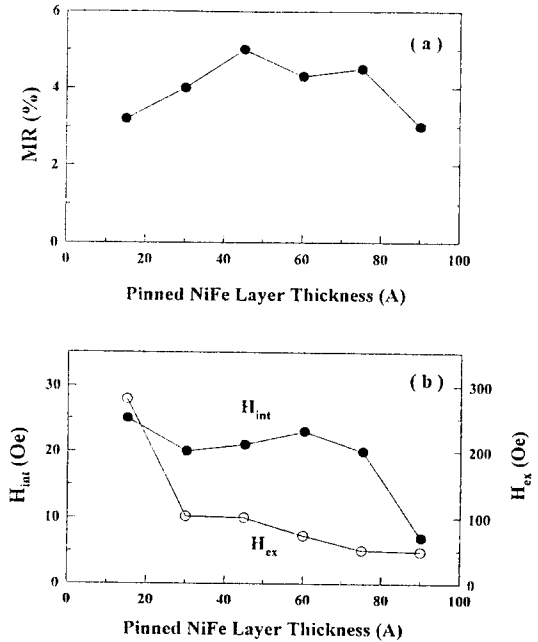


Fig. 6. Dependence of (a) MR ratios, (b)  $H_{int}$  and  $H_{ex}$  on the pinned NiFe thickness in  $NiO_{400\text{\AA}}/NiFe_t\text{\AA}/Cu_{25\text{\AA}}/NiFe_{60\text{\AA}}$  spin valve films.

#### IV. 결 론

반강자성  $NiO$ 에 의해서 교환 결합된  $NiFe/Cu/NiFe$  스핀밸브 박막에서 각 NiFe, Cu층의 두께 변화에 따라 강자성층과 반강자성층, 강자성층 사이의 결합력을 조사

하였다.

Cu층의 두께 증가에 따라 자기저항비는 약 4 % 내외로 다층박막에서의 진동형태와 비슷한 주기성(약 12 Å)을 보이며, 이때 사이층 결합력은 Cu 두께 증가에 따라 서서히 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다. 실험결과 약 20 Oe 미만의 작은  $H_{int}$  를 보임으로써 응용 면에서 자구 안정화에 의한 재생출력의 향상에 도움이 되리라 생각된다.

제1자성층의 두께 변화에 따른 실험 결과 두께 증가에 따라  $H_{ex}$  가 280 Oe에서 50 Oe로 감소함에 따라 사이층 결합력( $H_{int}$ )은 25 Oe에서 7 Oe로 서서히 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

제2자성층의 두께 증가는 제1자성층의 두께변화와 마찬가지로 자기저항비에는 큰 영향을 미치지 않으나,  $H_{ex}$  는 110 Oe에서 80 Oe로 약간의 감소를 보이며,  $H_{int}$  는 제1자성층의 두께증가에 의한 자화량의 증가로 10 Oe에서 20 Oe로 약간의 증가를 관찰하였다.

### 감사의 글

본 연구는 1997년 핵심전문연구과제(971-0210-045-1)에 의해 이루어졌으며, XRD 측정분석결과는 1996년 기초과학 지원연구소 연구기자재 및 시설 공동 이용사업의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] D. H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P. A. Schroeder, W. P. Pratt, Jr, and R. Laloe, J. Magn, Magn, Mat. **94**, L1 (1991).
- [ 2 ] S. S. P. Parkin, Z. G. Li and J. Smith, Appl. Phys. Lett. **58**, 2710 (1991).
- [ 3 ] C. Tsang, J. Appl. Phys. **55**, 2226 (1984).
- [ 4 ] K. T. Y. Kung, and L. K. Louie, J. Appl. Phys. **69**, 5634 (1991).
- [ 5 ] W. H Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **105** (1957).
- [ 6 ] C. Tsang, IEEE Trans. Mag. **105**, 3692 (1989).
- [ 7 ] W. L. Roth, Phys. Rev. **110**, 6 (1958).
- [ 8 ] T. C. Anthony, J. A. Brug, and S. Zhang, IEEE Trans. Mag. **30**, 3819 (1994).
- [ 9 ] J. C. S. Kools, Th. G. S. M. Rijks, A. E. M. De Veirman, and R. Coehoorn, IEEE Trans. Mag. **31**, 3918 (1995).
- [ 10 ] W. Egelhoff, P. Chen, C. Powell, M. Stiles, and R. McMichael, J. Appl. Phys. **79**, 5277 (1996).
- [ 11 ] J. L. Leal and M. H. Kryder, IEEE Trans. Mag. **32**, 4642 (1996).
- [ 12 ] S. S. Lee, D. G. Hwang, C. M. Park, K. A. Lee, and J. R. Rhee, J. Appl. Phys. **81**(8), 5298 (1997).
- [ 13 ] R. E. Camley and J. Banas, Phys. Rev. Lett. **63**, 664 (1989).
- [ 14 ] P. F. Carcia and A. Suna, J. Appl. Phys. **54**, 2000 (1983); R. Dimmich, J. Phys. F Met. Phys. **15**, 2477 (1985); A. Barthelemy and A. Fert, Phys. Rev. **B 43**, 13, 124 (1991).
- [ 15 ] A. P. Malozemoff, J. Appl. Phys. **63**, 3874 (1988).
- [ 16 ] C. H. Lai, T. C. Anthony, E. Iwamura and R. White, IEEE Trans. Mag. **32**, 3419 (1996).
- [ 17 ] B. A. Everitt, D. Wang, J. M. Daughton, IEEE Trans. Mag. **32**, 4657 (1996).
- [ 18 ] A. Fert, P. Grünberg, A. Barthélémy, F. Petroff, W. Zinn, J. Magn, Magn, Mat. **140-144**, 1-8 (1995).
- [ 19 ] H. Hoshiya, M. Komuro, K. Mitsuoka and Y. Sugita, 日本應用磁氣學會誌. **32**, 355 (1994).
- [ 20 ] J. L. Leal and M. H. Kryder, J. Appl. Phys. **79**, 2801 (1996).

## Exchange and Interlayer Coupling in NiO Spin Valve Films

C. M. Park, S. H. Ko, D. G. Hwang\*, S. S. Lee\*, and K. A. Lee

*Department of Physics Dankook University, Cheonan 330-714*

*\* Department of Physics Sangji University, Wonju 220-702*

(Received 21 August 1997, in final form 15 September 1997)

Exchange and interlayer couplings between a NiFe ferromagnetic layer and an antiferromagnetic NiO layer in NiO/NiFe/Cu/NiFe spin-valve films prepared by rf/dc magnetron sputtering were investigated. The interlayer coupling field ( $H_{\text{int}}$ ) decreased with the Cu layer thickness, and the exchange coupling field ( $H_{\text{ex}}$ ) saturated to 90 Oe. the magnetitudes of  $H_{\text{ex}}$  and  $H_{\text{int}}$  decreased with increasing thickness of the pinned NiFe layer. The increase of  $H_{\text{int}}$  with the free NiFe layer may be due to the increased magnetization.