

IrMn 교환결합층을 갖는 스핀밸브막에서의 열적안정성과 자구구조 관찰

이병선[†] · 정정규 · 이찬규 · 구본훈* · 야스노리 하야시

창원대학교 금속재료공학과
*창원대학교 세라믹 공학과

Thermal Stability and Domain Structure in Spin Valve Films with IrMn Exchange Biased Layers

Byeong-Seon Lee[†], Jung-Gyu Jung, Chan-Gyu Lee, Bon-Heun Koo* and Yasunori Hayashi

Department of Metallurgy and Materials Science, Changwon National University
*Department of Ceramic Science and Engineering, Changwon National University

(2003년 12월 1일 받음, 2004년 1월 7일 최종수정본 받음)

Abstract We have investigated the magnetic domain structure and the thermal stability of magnetotransport properties of IrMn biased spin-valves containing Co, CoFe and NiFe. The magnetic domain structures were imaged using a magneto-optical indicator film(MOIF) technique. To investigate the thermal stability, magnetoresistance(MR) was measured at annealing temperature(T_{ANN}) and room temperature(T_{RT}) followed by the annealing. Domain imaging reveal that the increase of annealing temperature led to changes in the exchange coupling between the two ferromagnet(FM) layers through nonmagnetic layer rather than between FM and antiferromagnet. Unlike the NiFe biased IrMn spin valve with large domains, MOIF pictures of Co and CoFe biased IrMn spin valve structures show the formation of many small microdomains. The magnetic structure, as revealed by the domain images, appeared unchanged while the MR dropped dramatically. From the combined giant magnetoresistance(GMR) and MOIF results, it was apparent that the decrease of MR ratio was not related to the spin valve magnetic structure up to about 350°C(T_{RT}).

Key words : thermal stability, magnetoresistance, magnetic domain, sputtering, annealing

1. 서 론

고도 정보화 사회에 있어서 필수불가결한 대용량 정보 저장용 하드디스크 드라이브(Hard Disc Drive, HDD)의 면기록도 향상을 위해서 거대자기저항(Giant Magnetoresistance: GMR)을 이용한 스핀밸브 GMR 헤드에 대한 연구가 계속되고 있다. 스핀밸브형 GMR 소자는 낮은 자장범위에서 큰 자기저항변화가 생기는 높은 민감도를 가지는 소자로서, 고밀도 자기기록매체의 재생헤드 및 MRAM(Magnetoresistance Random Access Memory) 등의 실제 응용에 있어 큰 자기저항비와 열적안정성을 가지는 재료들을 필요로 한다.^{1,2)} 그 중 IrMn을 교환결합층으로 한 스핀밸브막은 높은 블로킹온도(Blocking temperature: T_b)와 높은 교환결합자장 그리고 우수한 내식성으로 주목받고 있으며, 이미 1998년에 처음으로 스핀밸브 GMR 헤드로서 HDD에 적용된 바 있다.

자기헤드는 동작 시 주위로부터의 발열과 헤드 자체 발열로 인해 최악의 경우에는 150°C 이상의 고온으로 되는데, 이런 상황에서 자유층(free layer)의 노이즈(noise)

제거를 위해 설치된 경질자성막으로부터의 bias 자계, 센스전류자계, 매체자계 등의 외부자계에 노출되게 된다. 외부로부터의 이러한 열적 및 반전자계(remagnetization field)에 스핀밸브 구조가 견디지 못하면 새로 생성된 자구, 자벽으로부터의 노이즈발생, 고정층(pinned layer)의 고착능의 불안정으로 인한 자기저항변화(MR ratio) 저하 및 매체 자계에 대한 선형응답성의 열화가 발생하여 결과적으로는 헤드의 재생출력이 저하하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 FM/Cu/FM/IrMn 구조의 스핀밸브막에서 FM층(Co, CoFe, NiFe)에 따른 열적 안정성을 어닐링(annealing) 중의 온도에서 측정하는 방법(T_{ANN})과 어닐링 후 상온으로 냉각하여 측정하는 방법(T_{RT})으로 각기 자기저항비의 변화를 통하여 열화의 원인 및 현상 등을 고찰하였다. 또한 자기광학 필름(Magneto-Optical Indicator Film: MOIF) 방법³⁻⁵⁾을 이용하여 자구관찰을 통한 증착 및 어닐링한 시료의 자화반전과정에서 자구의 생성 및 이동 등 자구구조의 거시적인 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

IrMn 교환결합층을 가지는 스핀밸브막의 열적 안정성

[†]E-Mail : mist2020@hanmail.net

을 조사하기 위하여 Si/Ta(5 nm)/FM(3 nm)/Cu(2.5 nm)/FM(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) 구조의 Top형 스핀밸브막을 제조하였다. FM층에 따른 열적안정성을 알아보기 위해 두께는 동일하게 하여, 각기 구조를 Co/Cu/Co/IrMn, CoFe/Cu/CoFe/IrMn 및 NiFe/Cu/NiFe/IrMn로 제작하였다. 증착은 DC 마그네트론 스퍼터링(DC magnetron sputtering)을 이용하였으며, 초기진공도는 7×10^{-8} Torr 정도로 하였고, 증착시 Ar 압력은 1.5~3.0 mTorr로 조절하였다. 기판의 온도는 상온이었으며, 박막제조 중에 인가한 자장은 300~400 Oe로 하였다. 타겟(target) 합금들의 조성은 각기 Mn-20 at%Ir, Co, Co-10 at%Fe, Ni-19 at%Fe였다.

어닐링에 따른 자기저항비 변화를 알아 보기 위하여, 이중 석영관을 이용하여 진공 중에서 내부 석영관에 발열체를 이용하여 시편이 가열 되도록 제작된 4단자 홀더를 사용하여, 각 온도를 유지한 상태에서 측정하는 방법(T_{ANN})과 어닐링 후 상온으로 냉각하여 측정하는 방법(T_{RT})을 이용하여 자기저항비 변화를 비교하였다. 측정은 상온에서 400°C까지 2×10^{-6} Torr의 진공중에서 무자장 어닐링을 하였다.

시편의 자기적 특성은 각 온도에서 30분 동안 어닐링 후 상온으로 냉각하여 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)를 통하여 측정 하였고, 자화반전시의 자구구조 변화를 관찰하기 위하여 MOIF를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1에 as-deposited 상태에서 측정한 스핀밸브막의 강자성층 종류에 따른 MR비와 자기적 특성값을 나타내었다. MR비는 Co-스핀밸브(Co-SV)에서 9.7%의 가장 높은 값을 나타내었으며, NiFe-스핀밸브(Py-SV)에서 4.5%의 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 연자성 특성이 우수한 permalloy를 강자성층으로 사용한 Py-SV보다 높은 스핀의존산란을 보이는 Co를 강자성층으로 사용한 Co-SV가 강한 스핀의존산란에 의해 더 높은 MR비를 나타내기 때문인 것으로 생각된다.⁶⁾ 반강자성층(antiferromagnetic)과 강자성층의 계면에서 발생하는 교환결합자장인 H_{ex} 는 Py-SV가 가장 큰 값을 나타내었으며, 비자성층 Cu를 사이로 고정층(pinned layer)과 자유층(free layer)의 두 개의 강자성층간 교환결합력인 H_{int} 는 Py-SV에서 가장 작은 값을 나타내었다. H_{int} 는 M-R곡선 또는 M-H곡선에서 자유층 loop의 zero 자계로부터의 이동자계로서 실험적으로 구할 수 있는데, 보통 식 (1)로 나타내며,⁶⁾

H_{RKKY} 와 H_{Neel} 의 두 종류의 강자성 층의 상호작용이 중첩된 결과이다.

$$H_{int} = H_{RKKY} + H_{Neel} \quad (1)$$

또한 H_{int} 는 식 (2)로도 나타낼 수 있으며, 이때 M_F 는 강자성층의 포화자화값을, t_F 는 강자성층의

$$H_{int} = J_{int}/M_F \times t_F \quad (2)$$

두께, J_{int} 는 강자성층의 층간 교환결합에너지를 나타낸다. 고정층과 자유층의 강자성적 결합은, 양쪽층에서의 자화의 반평행 배열을 방해하여 자기저항변화를 저하시키게 된다. 즉 H_{int} 가 낮게 되면 MR비는 커지는 경향을 나타낸다.

Figs. 1,2,3은 각각 Co-SV, CoFe-SV, Py-SV의 어닐링 온도(a)와 어닐링 후 상온(b)에서 측정한 자기저항곡선을 보여준다. 상온에서 측정한 자기저항곡선에서 Py-SV는 Co-SV, CoFe-SV보다 큰 자기저항곡선의 폭을 가지며, H_{ex} 값이 318 Oe로서 가장 높은 값을 나타내었다. 어닐링 온도가 증가할수록 어닐링 온도에서 측정한 자기저항곡선의 경우(a)에는 MR비의 감소와 함께 H_{ex} 를 예측

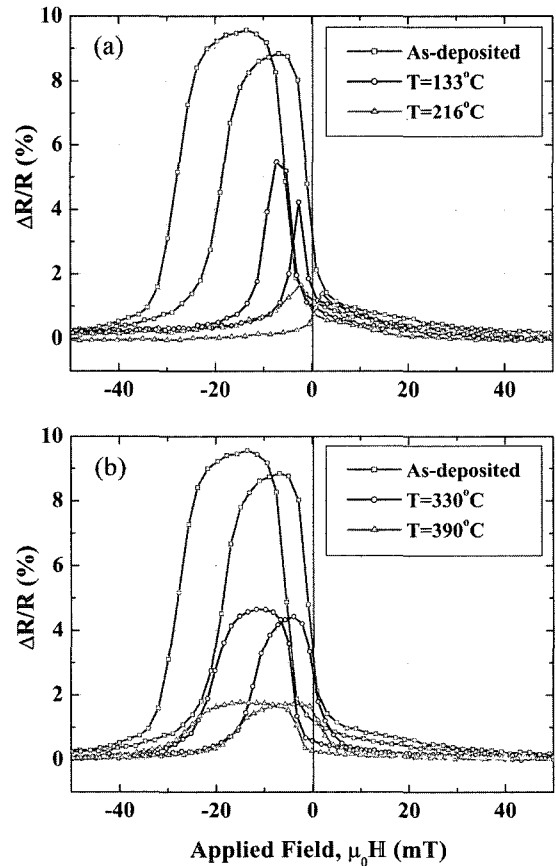


Fig. 1. MR curves in Co-SV at (a) annealing temperature (T_{ANN}) and (b) room temperature followed by the annealing (T_{RT}).

Table 1. Magnetic properties and MR ratios in as-deposited spin valve with different ferromagnetic layers.

FM layer	MR %	H_{ex} (Oe)	H_{int} (Oe)	H_c (Oe)
Co	9.6	176	10	25
CoFe	6.6	171	12	24
NiFe	4.51	318	20	13

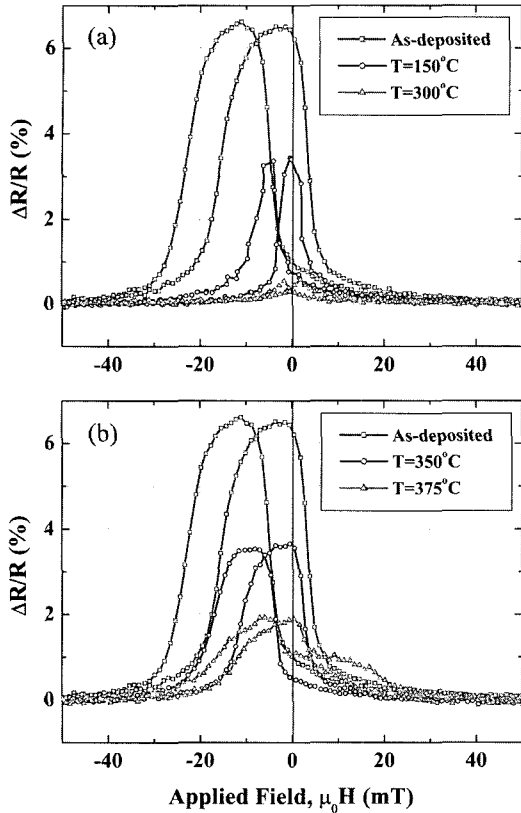


Fig. 2. MR curves in CoFe-SV at (a) annealing temperature (T_{ANN}) and (b) room temperature followed by the annealing (T_{RT}).

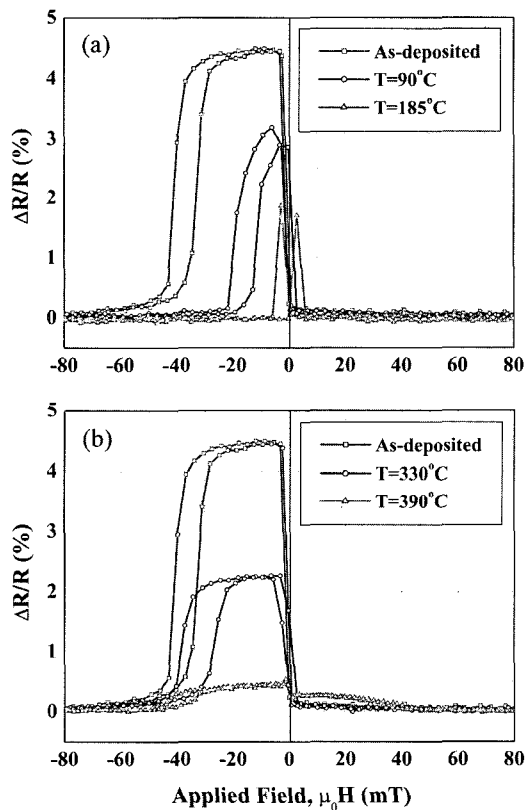


Fig. 3. MR curves in Py-SV at (a) annealing temperature (T_{ANN}) and (b) room temperature followed by the annealing (T_{RT}).

할 수 있는 자기저항곡선의 폭도 감소하나, 어닐링 후 상온으로 냉각하여 측정된 자기저항곡선(b)의 경우에는 온도에 따른 MR비, 즉 자기저항 곡선의 높이는 감소한 반면 자기저항 곡선의 폭은 크게 감소하지 않았다. 이는 상온에서 약 300°C까지는 MR비 보다는 H_{ex} 의 변화가 더 작음을 의미한다. 특히, 390°C에서 어닐링한 Py-SV의 경우에는 음(-)의 자장에서만 측정되던 MR비가 양(+)의 자장에서도 나타났으며, 이러한 현상은 as-deposited 상태에서의 균일한 자기구조(magnetic structure)와는 달리 어닐링에 의해 자기구조가 변형되었음을 의미한다.

Fig. 4에 온도에 따른 MR비 변화를 나타냈으며, Fig. 4(a)는 어닐링 온도(T_{ANN})에서 측정된 온도에 따른 MR비의 변화를 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 MR비는 모든 시료에서 직선적으로 감소하였으며, IrMn계 스핀밸브의 블로킹온도(T_b)로 알려진 약 260°C 부근에서 자기저항특성이 사라졌다.⁷⁾ H_{ex} 가 사라지는 T_b 이상의 온도에서는 반강자성체 입자들은 상자성 특성을 나타내며 열적 요동에 의해서 반강자성 특성을 상실하게 된다⁸⁾. 따라서, 약 260°C 부근에서 자기저항특성이 사라지는 현상은 이러한 열적 요동에 의한 것으로 판단된다. 이러한 MR비의 직선변화의 slope으로부터 온도계수 (temperature coefficient)를 구한 결과, Co-SV, CoFe-SV, Py-SV의 온도계수는 각각 -0.042, -0.021, -0.012%/Oe로 Py-SV가

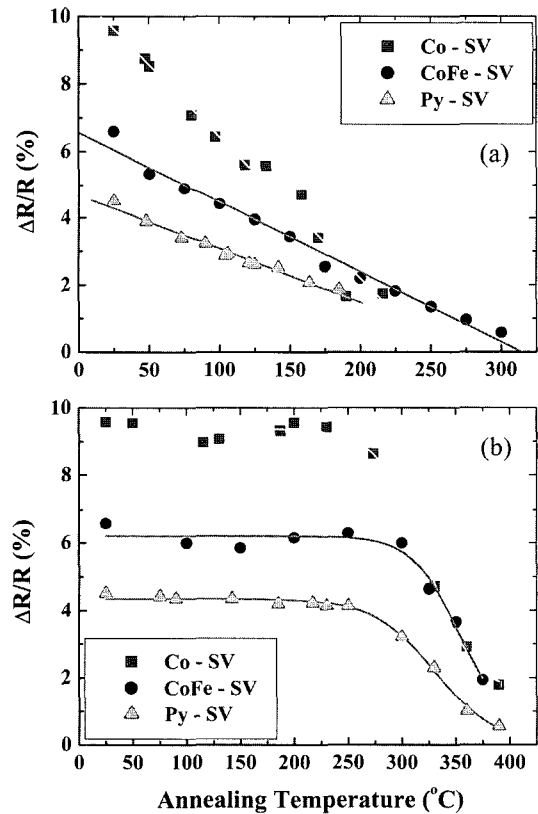


Fig. 4. MR ratios of Si/Ta(5 nm)/FM(3 nm)/Cu(2.5 nm)/FM(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) films measured at (a) annealing temperature(T_{ANN}) and (b) room temperature followed by the annealing (T_{RT}).

가장 작은 값을 나타내었다. 그러나 스핀밸브에서 MR비 및 H_{ex} , T_b 와 같은 특성들은 시료의 제조시 스퍼터 조건에 따라 변화한다고 알려져 있으므로,⁹⁾ 단순히 온도계수만을 고려하여 Py-SV가 열적으로 더 안정한 것으로는 판단할 수 없다. Fig. 4(b)는 각 온도에서 30분 동안 어닐링 후 상온(T_{RT})에서 측정된 MR비의 변화를 나타내었다. IrMn의 T_b 로 알려진 약 260°C까지는 MR비가 거의 변화가 없었지만, 그 이상의 온도에서는 급격히 감소하였으며 Co-SV의 경우 모든 온도범위에서 가장 높은 MR비를 나타내었다. 스핀밸브막 및 이층막에서의 온도 증가에 따른 계면반응에 의한 자기적 특성저하가 약 260°C까지는 변화가 없는 이유는, 이 온도 부근에서의 박막계면 원자의 상호확산거리가 수Å 정도로 알려져 있어,¹⁰⁾ 계면반응이 활발하지 않기 때문으로 사료된다.

이러한 고온에서의 열화현상을 이해하고자 어닐링에 의한 자구(magnetic domain) 변화 및 Co, CoFe 및 NiFe의 강자성 박막의 종류에 따른 자구조의 변화를 MOIF 기술을 이용하여 관찰하였다. 자구관찰시의 자장은 자화용이축 방향으로 인가하였으며, M_{top} 은 고정층의 자화를, M_{bottom} 은 자유층의 자화를 의미한다. Fig. 5는 as-deposited Co-SV의 자기이력곡선과 자화반전(magnetization reversal)시 관찰한 MOIF 사진이다. MOIF 사진은 시료의 모서리나 결합 부근에서 나오는 stray field를 이용한 것이다. (a)는 자화용이축을 따라 양(+)의 방향으로 500 Oe의 외부자계를 인가하여 자화시킨 후 자기장을 감소시켜 zero 자장에서 관찰한 MOIF 사진이다. 위 모서리에 나타난 백색의 contrast는 고정층과 자유층의 자화방향이 외부자계와 반대로 되었음을 나타낸다. 이후 음(-)의 방향으로 자계를 증가시키면 아주 미세한 자구들의 생성에 의해 자유층의 자화가 반대방향으로 반전한다(b). 이때 측정된 사진에서 보여주고 있는 자구는 자벽에서 산란된 자장에 의해 나타난다. 계속적으로 자계를 증가시키면 자유층의 자화반전만이 이루어져 반강자성 배열을 하게 되고 0에 가까운 자화값과 가장 높은 MR비를 갖는다. 이때 MOIF 사진에서 흑·백 contrast는 사라진다(c). 이후 계속하여 음(-)의 방향으로 자계를 증가하면 미세한 자구가 생성되면서 고정층의 자화반전이 시작되고(d), 300 Oe 이상에서 음(-)의 방향으로 고정층의 자화반전이 이루어져 고정층과 자유층은 평행한 배열을 하며 시료의 모서리에 강한 흑색의 contrast를 나타낸다(e). Fig. 5의 (f)~(h)는 반대방향인 양(+)의 방향으로의 자화(remagnetization)과정을 보여준다.

Fig. 6은 as-deposited CoFe-SV의 자기이력곡선과 자화반전(magnetization reversal)시 측정된 MOIF 사진을 보여준다. Co-rich 합금인 CoFe를 강자성층으로 사용한 스핀밸브의 경우에는 Co-SV와 유사하게 미세자구의 생성과 성장, 그리고 소멸에 의한 자화반전 과정을 나타내고 있다.

또한 어닐링 후의 스핀밸브막의 자구변화를 관찰하고자, Co-SV를 390°C에서 30분간 어닐링 후 상온에서의

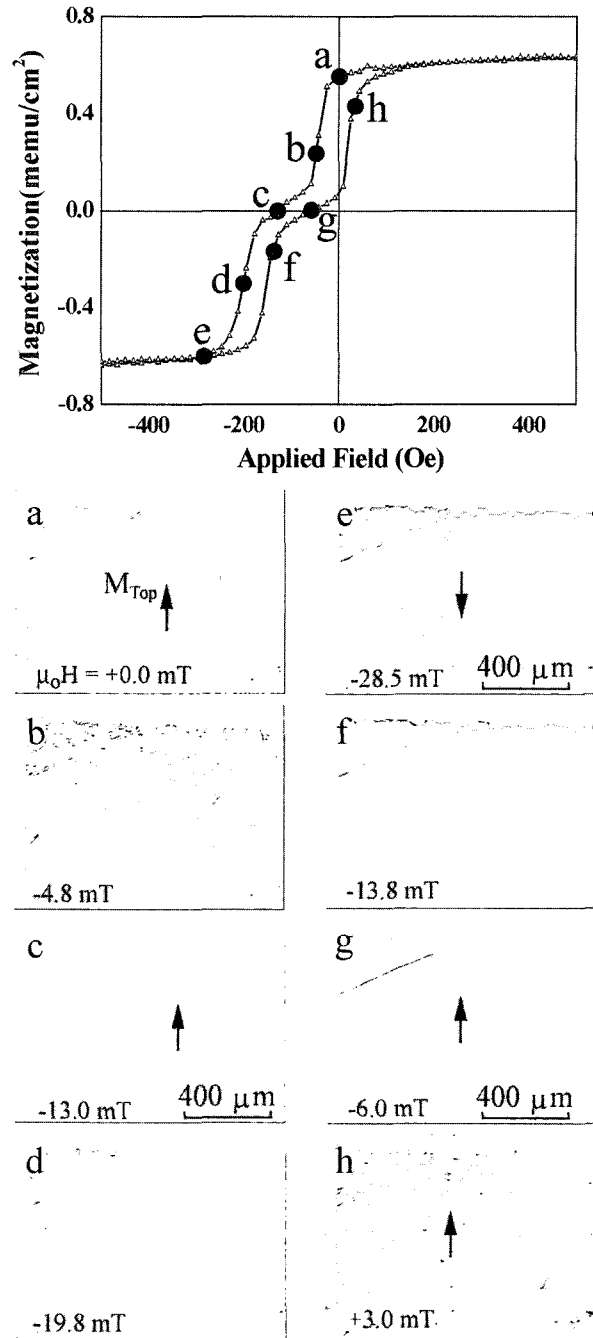


Fig. 5. Hysteresis loop (top) and MOIF images of the domain structure (a)~(h) taken during the magnetization reversal of as-deposited Co-SV.

자구와 자화반전 과정을 MOIF를 통해 관찰하였다. Fig. 7은 390°C에서 어닐링 후 상온에서 측정된 Co-SV의 자기이력곡선과 MOIF 사진이다. 어닐링 후에도 H_{ex} 는 거의 변하지 않음을 알수있다. Fig. 5의 as-deposited 상태와 마찬가지로 고정층과 자유층이 반강자성 배열을 하면 흑·백 contrast는 사라지고, 강자성 배열을 하면 시편의 모서리에 강한 흑·백의 contrast를 나타낸다. Co-SV와 CoFe-SV에서 어닐링 후 자구조의 변화는 관찰되지 않았으며, 따라서 이 스핀밸브막의 구조에서는 고온에서 발생하는 자기저항비의 감소가 자구조와는 관계가 없음

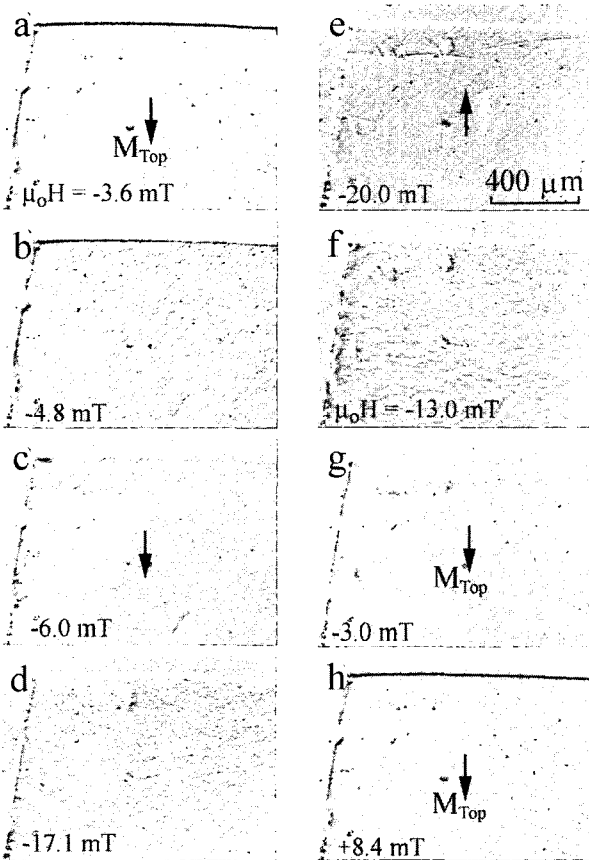
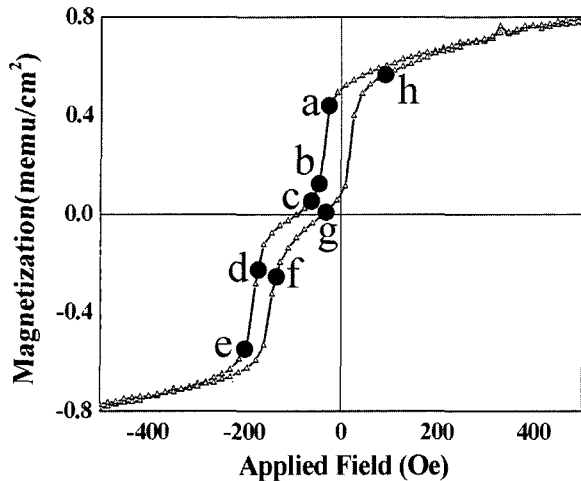


Fig. 6. Hysteresis loop (top) and MOIF images of the domain structure (a)~(h) taken during the magnetization reversal of as-deposited CoFe-SV.

을 알 수 있다.

Fig. 8은 as-deposited Py-SV의 자기이력곡선과 자화반전(magnetization reversal)시 측정된 MOIF 사진으로, 반평행한 자기모멘트를 가지는 자구의 생성과 성장에 의한 자화반전 과정을 보여준다. (a)는 자화용이축을 따라 음(-)의 방향으로 700 Oe의 자계를 인가하여 포화시킨 후 0 자장에서의 자구구조를 나타내었다. 시료의 모서리에 나타난 강한 흑의 contrast는 자유층과 고정층이 모두 일축이방성 방향으로 포화되었다는 것을 의미한다. 양(+)

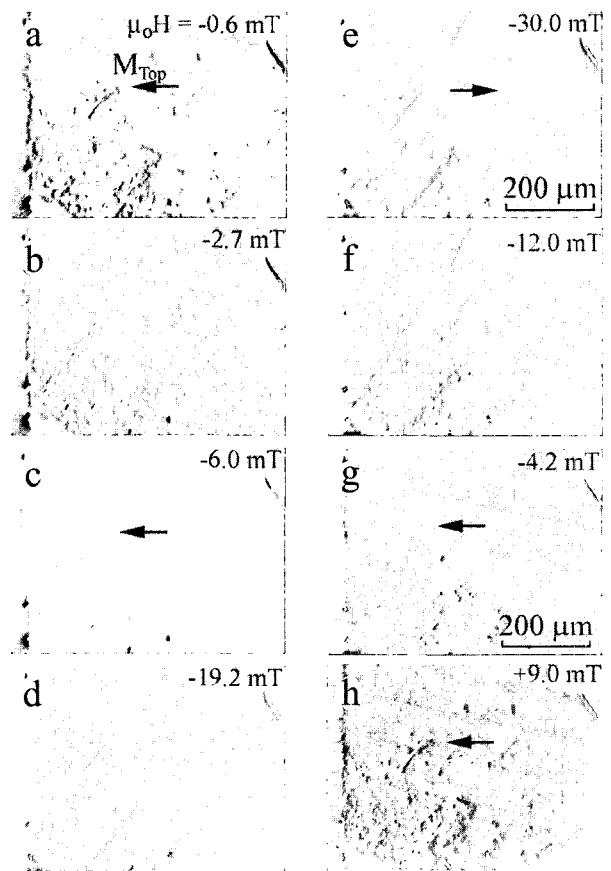
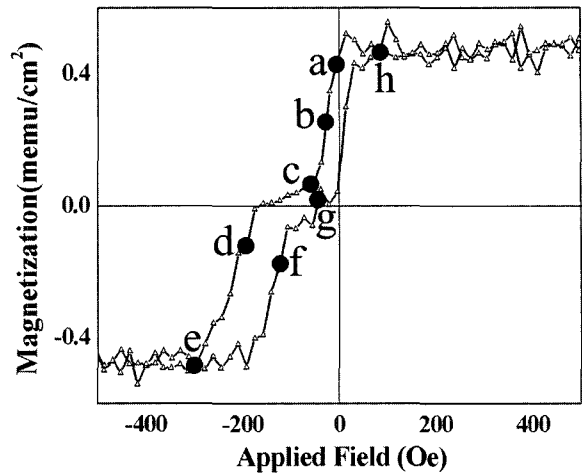


Fig. 7. Hysteresis loop (top) and MOIF images of the domain structure (a)~(h) taken during the magnetization reversal of Co-SV after annealing at 390 °C.

방향으로 자계를 증가시키면 반평행한 자기모멘트를 가지는 자구의 생성과 함께 자벽이 이동하며(b~d), 60 Oe의 자장에서 자유층의 자화반전이 이루어지며 시료의 모서리에서는 어떠한 contrast도 나타나지 않는다(e). 이후 양(+)의 방향으로 계속하여 자계를 증가시키면 고정층의 자화반전도 이루어지며 시료의 모서리에서는 백의 contrast가 관찰된다(f). 또한, Figs. 5, 6과 비교하면 자유층의 자화반전은 미세 자구의 생성과 성장, 소멸에 의해 발생하는 Co-SV, CoFe-SV와는 달리 반평행한 자기모멘트를 갖

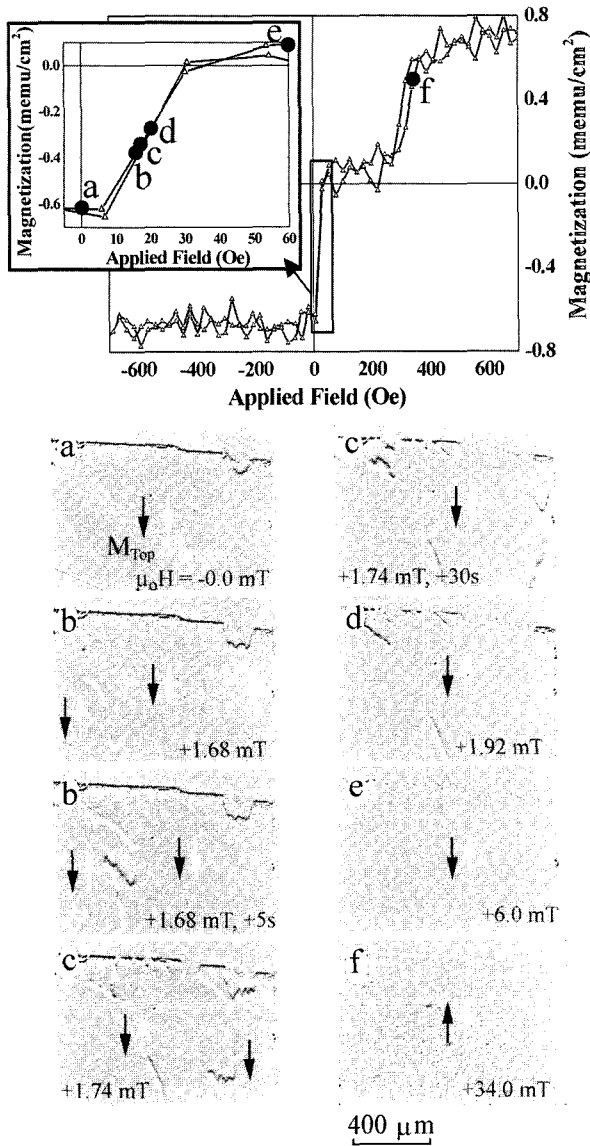


Fig. 8. Hysteresis loop (top) and MOIF images of the domain structure (a)~(f) taken during the magnetization reversal of as-deposited Py-SV.

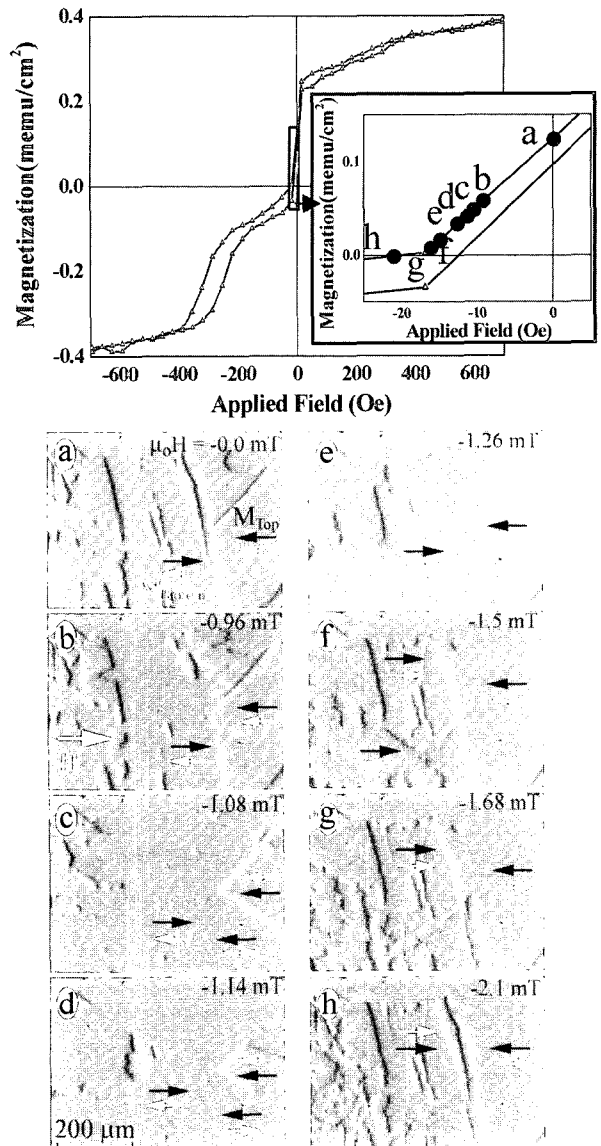


Fig. 9. Hysteresis loop (top) and MOIF images of the domain structure (a)~(h) taken during the magnetization reversal of Py-SV after annealing at 390°C.

는 자구의 생성과 자벽의 이동에 의해 이루어지며, 고정층의 자화반전은 약 340 Oe 이상의 자계에서 미세한 자화의 회전에 의해 일어나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 390°C에서 어닐링 후 상온에서 측정한 Py-SV의 자기이력곡선과 자구구조에 대한 MOIF 사진이다. 이 경우에도 어닐링 후의 H_{ex} 값은 as-deposited 상태의 값과 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 자구구조는 as-deposited 상태인 Fig. 8과 비교하여 보다 복잡한 형태를 나타내며, 자유층과 고정층의 자화가 강자성 결합만을 가지던 zero 자장 (Fig. 8a)에서 어닐링 후에는 반강자성 결합을 하는 부분 (Fig. 9a)이 나타났다. 이때 관찰되는 흑·백의 contrast는 다른 형태의 층간 교환결합력을 가지는 두 부분에서의 안정한 자벽을 보여준다. 음(-)의 방향으로 자계를 증가시키면 고정층과 강자성 결합을 하는 부분에서 자유층의 자화반전이 이루어지며 반강

자성 결합을 하는 부분에서 새로운 자구의 생성과 자벽의 이동을 관찰할 수 있다(b~c). 이후 새로운 자벽은 안정한 위치(e~g)로 이동하며 최초 고정층과 반강자성 결합을 하던 자유층의 자화는 음(-)의 방향으로 포화된다. 그러므로 자유층의 자화반전은 초기 zero 자장에서 관찰된 자구구조(a)와 유사한 형태를 가지며 완료되지만, 자유층의 자화방향은 반대가 된다(h). 계속하여 음(-)의 방향으로 자계를 증가시키면 미세한 자화회전에 의해 최초 자유층과 강자성 결합을 하던 고정층의 자화반전이 이루어진다. 반대방향으로의 자화(remagnetization)는 이러한 과정의 역순으로 진행된다. 또한, Fig. 3(b)의 자기저항 곡선과 비교하여 다른 온도와는 달리 390°C에서 어닐링 후 양(+)의 자장에서 나타난 MR비의 원인은 최초 반강자성 결합을 하는 부분의 자화반전에 의한 것임을 알 수 있었다. 그리고 초기 균일한 강자성 결합을 하던 강

자성층에서 어닐링한 후에 나타난 반강자성 결합으로의 변형은 H_{int} 의 변화를 의미하며, 이러한 H_{int} 의 변화로부터 어닐링 후 Cu층의 두께가 변화하였음을 알 수 있다. 따라서, 390°C에서 어닐링한 Co-SV와 Py-SV의 자구구조를 나타낸 Fig. 7과 9의 결과로부터 Co 및 Co-rich의 CoFe 합금과 NiFe는 비자성층인 Cu의 계면에서 어닐링 시에 서로 다르게 반응함을 알 수 있다. 이는 전율고용체인 Cu-Ni과 500°C 이하의 온도에서 낮은 고용도를 갖는 Co-Cu의 2원계 평형상태도¹¹⁾에서 예측할 수 있듯이 Py/Cu/Py보다 Co/Cu/Co에서의 Co와 Cu 원자들의 intermixing이 적게 발생하기 때문으로 생각되며, 스핀밸브에서 MR비의 감소원인도 H_{ex} , H_c 와 같은 자기적 성질의 변화보다는 이러한 층들간의 계면반응에 의한 것으로 사료된다. 따라서 Co-SV와 CoFe-SV막에서 약 260~390°C에서의 어닐링 후 자기저항비가 감소하는 것은 Co/Cu/Co 계면에서의 intermixing보다 입계 및 일부계면을 통한 확산에 의해 계면거칠기가 증가하기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또한 Py-SV에서의 MR비의 감소는 Py/Cu/Py의 계면에서 어닐링에 의해 발생하는 Ni과 Cu의 심한 intermixing에 의한 것으로 사료된다.¹²⁾ 이러한 사실은 Fig. 9의 자구관찰 결과로부터 알 수 있듯이 Cu를 사이에 둔 강자성층과의 심한 계면반응에 의해 스핀계면산란을 유도하는 박막층이 붕괴되어 강자성구역과 반강자성구역이 새로운 자구구조로 변화했음을 말해준다.

4. 결 론

DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작한 Si/Ta/FM/Cu/Fm/TrMn/Ta 구조의 스핀밸브막에서 FM(Co, CoFe, NiFe)층에 따른 열적안정성과 자구구조를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) As-deposited Py-SV의 MOIF 측정 결과, 미세 자구의 생성과 성장, 그리고 소멸에 의한 자화반전이 이루어지는 as-deposited Co-SV와 CoFe-SV와는 달리, Py-SV에서는 반평행한 자기모멘트를 가지는 자구의 생성과 성장에 의해 자화반전이 일어남을 알 수 있었다.

2) 390°C에서 어닐링 후 상온에서 측정한 Py-SV의 MOIF 측정결과, 초기 균일한 강자성 결합만을 가지던 부분에서 어닐링 후 반강자성 결합을 하는 부분이 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 강자성층간 교환력 (H_{int})의 변화를 의미하며, 이러한 H_{int} 의 변화는 어닐링 후 Cu층의 두께변화에 의한 것으로 사료된다. 이와 달리 390°C에서 어닐링 후 상온에서 측정한 Co-SV의 MOIF 측정 결과, as-deposited 상태와 유사한 자구구조

가 관찰되었다. 이러한 결과들로부터 Co와 NiFe는 비자성층인 Cu와 고온에서 서로 다르게 반응함을 확인할 수 있었다.

3) T_{ANN} 에서 측정한 MR비는 온도가 증가함에 따라 모든 시료에서 직선적으로 감소하였으며, 약 260°C 부근에서 자기저항특성이 사라졌다. 이 온도는 IrMn계 스핀밸브의 blocking 온도(T_b)와 거의 유사함을 확인할 수 있었고, 이러한 직선적인 감소는 열적 요동에 의한 것으로 판단되었다.

4) T_{RT} 에서 측정한 MR비는 약 260°C까지 거의 변화가 없었으나 그 이상의 온도에서는 급격히 감소하였다. VSM과 MOIF 측정결과로부터 이러한 260°C 이상에서의 급격한 감소는 H_{ex} , H_c , M_s 와 같은 자기적 특성의 변화보다는 강자성층과 비자성층간의 계면반응에 의한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구사업(301-05-2)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. Irie, H. Sakakima, M. Satomi and Y. Kawawake, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 1415 (1995).
2. J. M. Daughton, J. Magn. Magn. Mater., **192**, 334 (1999).
3. C. G. Lee, J. G. Jung, R. D. McMichael, R. A. Fry, A. Chen, W. F. Egelhoff and V. S. Gornakov, J. Appl. Phys., **91**(10), 8566 (2002).
4. V. S. Gornakov, V. I. Nikitenko, A. J. Shapiro, R. D. Shull, J. Samuel Jiang and S. D. Bader, J. Magn. Magn. Mater., **246**, 80 (2002).
5. L. E. Helseth, J. Magn. Magn. Mater., **247**, 230 (2002).
6. J. C. S. Kools, W. Kula, D. Mauri and T. Lin, J. Appl. Phys., **85**(8), 4466 (1999).
7. J. P. Nozieres, S. Jaren, Y. B. Zhang, K. Pentek, A. Zeltser, P. Wills and V. S. Speriosu, J. Appl. Phys., **87**(9), 6609 (2000).
8. E. Fulcomer and S. H. Charap, J. Appl. Phys., **43**, 4190 (1972).
9. M. Mao, C. Cerjan, B. Law, F. Grabner and S. Vaidya, J. Appl. Phys., **87**(9), 4933 (2000).
10. J. G. Jung, C. G. Lee, B. H. Koo, G. H. Lee and Y. Hayashi, Korea Journal of Materials Reserch, **13**(7), 447 (2003).
11. T. Nishizawa and K. Ishida, Binary Alloy Phase Diagram, **2**, 1181 (1984).
12. L. van Loyen, D. Elefant, D. Tietjen, C. M. Schneider, M. Hecker and J. Thomas, J. Appl. Phys., **87**(9), 4852 (2000).