

## CoFe/Cu/CoFe/IrMn 스핀밸브 박막의 자유층 두께 감소에 따른 연자성 자기저항 특성 연구

최종구<sup>1</sup> · 고인숙<sup>2</sup> · 공유미<sup>2</sup> · 김민호<sup>2</sup> · 박영석<sup>1</sup> · 황도근<sup>1,2</sup> · 이상석<sup>1,2\*</sup>

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

(2009년 4월 9일 받음, 2009년 4월 14일 최종수정본 받음, 2009년 4월 16일 게재확정)

[CoFe/Cu/CoFe]/IrMn 다층박막에 대하여 자유층 CoFe 두께에 따른 상호교환결합력, 교환결합세기, 보자력, 자기저항비, 자장감응도 등의 자기저항 특성을 관찰하였다. IrMn 층을 통해 유도된 강자성체/비자성체/강자성체 구조인 CoFe(t)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) 다층박막은 자유층 CoFe 두께 30 Å일 때 작은 보자력과 높은 자장감응도를 유지하는 연자성 특성을 보였다. 반면에 자유층 CoFe 두께 90 Å일 때 큰 보자력과 낮은 자장감응도를 보였다. 양호한 연자성 특성을 갖는  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$  크기의 CoFe(30 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) 스핀밸브 소자를 제작하였다. 길이방향의 센싱전류와 폭방향의 고정층의 용이축 방향을 택하여 2 단자법으로 측정된 소자의 연자성 자기저항 특성인 자기저항비와 자장감응도는 각각 3.0%와 0.3%/Oe 이었다.

**주제어** : 자유층 CoFe, 연자성, 자장감응도, IrMn-CoFe GMR-SV 소자

### I. 서 론

자기장 센서들은 선형 혹은 회전 부호 메깁기, 근접검출기, 속도 및 위치센서, 지자기장 자력계 등에서 폭넓게 상용화되어 왔다. 나노기술과 생명공학기술을 융합하는 연구의 발전으로 인해 최근 수년간 바이오센서로서 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve; GMR-SV) 소자의 활용이 가능해 왔고, 다양한 적용이 최근 많은 관심을 불러일으키고 있다[1-3]. 그리고 의료기술의 학제간 융합연구를 통한 바이오센서 개발과 그에 대한 생체물질 내에서의 화학적 혹은 화학물질을 검출하기 위한 시스템 및 소자 개발과 생체 분자구조의 존재 및 농도를 측정하는 감지형 바이오소자 개발이 여러 그룹에서 진행되고 있다[4-6]. 또한 효소나 항체가 인체 혈액 내의 혈당과 단백질 분자 검출에 사용되는 기술과 세포수준으로서의 면역성 효소와 같은 생체효소를 이용하여 개발한 소자들이 한 분야를 차지하고 있다. 그리고 많은 양의 생체분자로 인해 결합력 분석과 분해능의 한계는 나노크기의 검출능력을 갖는 고감도 자성소자의 출현으로 극소량의 변화를 인식하는 것이 가능할 수 있게 되었다.

국내에서는 KIST, 충남대, 고려대, 연세대에서 자기저항임피던스를 이용한 바이오센서와 Finemet 소재를 연구하는 것으로 알려져 있으나 초연자성 박막에 대한 연구는 하지 않고 있는 실정이다. 또한, 본 연구팀에서는 약 0.5%/Oe 감응도를 갖는 GMR-SV를 이용하여 생체 맥진센서를 개발하여 3차원 공간적 시간적 생체맥진신호를 디스플레이 하는데 성공하였

다[7]. 또한 0.1~0.8%/G 감도의 스핀밸브 바이오센서를 이용하여 혈액의 Fe를 포함한 적혈구 헤모글로빈(Hemoglobin) 검출에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 자장감응도의 취약성과 주파수에 따른 센싱 범위의 한계 등으로 해결해야 할 많은 문제점을 가지고 있다[8].

본 연구는 바이오센서로 활용할 반강성체 IrMn 층을 기반으로 CoFe/Cu/CoFe 3층 구조의 고감도 GMR-SV 다층박막구조를 제작하였다. 박막의 연자성 특성 조건을 얻기 위하여 자유층 CoFe 두께에 의존하는 보자력, 자기저항비, 교환결합세기, 상호교환결합력, 자장감응도를 조사하였다. 일반적으로 자유 자성층의 두께가 증가할수록 보자력과 자기저항비는 감소하지만, CoFe-IrMn 형태의 SV 박막구조에서는 CoFe 층의 두께가 감소할 때, 최소값의 보자력과 최대값의 자장감응도 특성을 갖는  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$  크기의 GMR-SV 소자를 제작하였다. 고정층은 폭방향을 자성 용이축으로, 자유층은 길이방향으로 형성자기 이방성을 갖도록 유도하였다. 제작한 소자에 대한 그 자기저항 특성 변화를 관찰하여 바이오소자로의 활용 가능성을 확인하였다.

### II. 실험방법

Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta(top) 다층박막을  $3 \times 10^{-6}$  Torr인 초고진공 증착 시스템을 이용하여 유리(Corning 7059) 기판 위에 마그네트론 스퍼터링 방법으로 상온에서 증착하였다. 증착시 일축 방향 이방성 자기장은 인가하지 않았다. Ta, CoFe, Cu, IrMn의 독립적인 3인치 타겟들을 증착시 플라즈마의 상호간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 방지하기 위해 스

\*Tel: (033) 738-7961, E-mail: sslee@sangji.ac.kr

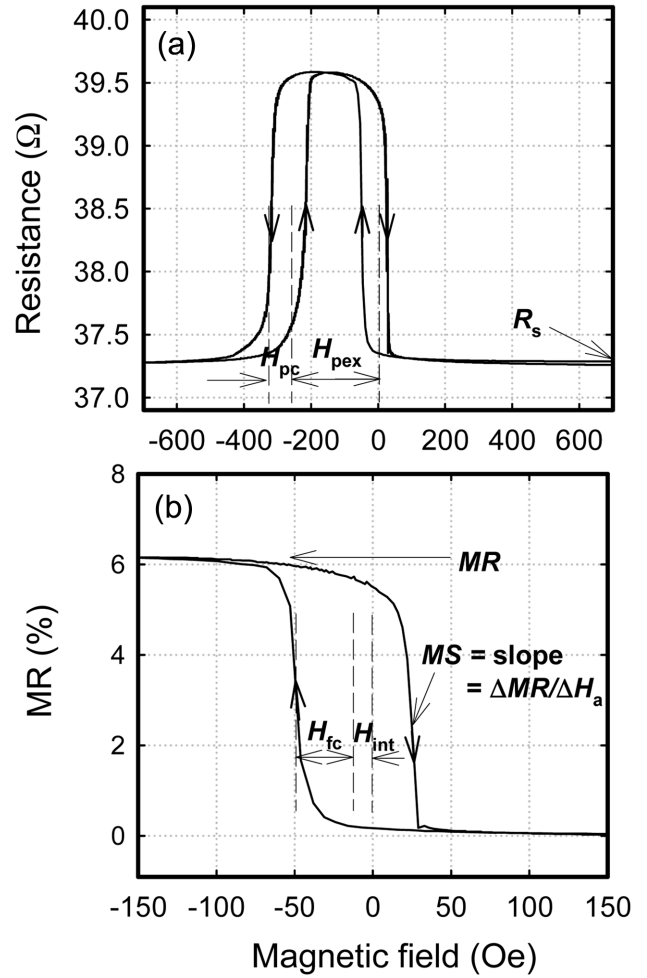
테인레스 분리판을 사용하였다. Ta, CoFe, Cu, IrMn 박막들의 증착율은 각각 1.0, 1.5, 1.2, 1.0 Å/s 이었다. 증착시 0.2 mm 두께의 스테인레스 그림자 마스크를 이용하여 폭 5 mm 길이 10 mm의 4-단자 정방 십자형 박막시료의 크기를 제작하였다. 바닥 자유자성층 CoFe를 제외한 Cu, CoFe/IrMn 박막의 두께는 각각 25 Å, CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) 로 하였으며, GMR-SV 특성이 양호한 bottom 층과 top 층의 Ta 박막 두께는 각각 80 Å와 40 Å로 정하였다. 여기서 bottom 층 바로 위의 자유층 강자성체 CoFe의 두께는 30 Å에서 90 Å 까지 15 Å 간격으로 변화시켰다.

시료의 자기이력곡선은 박막 면에 수평인 외부자기장을 인가해 십자형 박막전극 4-단자법으로 전류와 전압을 측정하여 자기저항곡선으로부터 얻었다. 용이축과 곤란축 자기저항곡선은 증착시 일축이방성 자기장 방향과 각각 수평 및 수직 방향으로 인가하여 측정하였다. [CoFe/Cu/CoFe]/IrMn 다층박막의 자유층 강자성체 CoFe 층 두께를 달리하여 포화되는 상호교환결합력, 보자력, 교환결합세기, 자기저항비 및 자장감응도 크기 변화를 측정된 자기저항곡선으로부터 조사하였다.

리소그래피 공정을 이용하여  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$ 의 PR(photoresist) 영역을 남기고 전자 사이클로트론 공명장치(electron cyclotron resonance; ECR) Ar 이온 밀링으로 식각을 하였다[9]. 여기서 증착시 인가한 자기장 용이축 방향을 소자의 길이방향으로 하여 형상자기이방성 효과가 나타나도록 하였다. 소자로서 밀링 후 아세톤으로 PR을 제거하고 다시 리소그래피 lift-off 방식으로  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 의 실제 영역만 남게 Cu(500 Å) 전극을 형성하였다. 소자 공정 효과로 인한 산화막 및 표면 오염으로 인한 자기저항 특성 변화를 최소화하기 위하여 표면처리과정을 거친 후 *in-situ* 공정으로 바로 전극을 증착하였다. 소자의 자기저항 특성은 상온에서 2-단자 자기저항 측정시스템으로 측정된 자기저항곡선으로부터 각각 결정하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

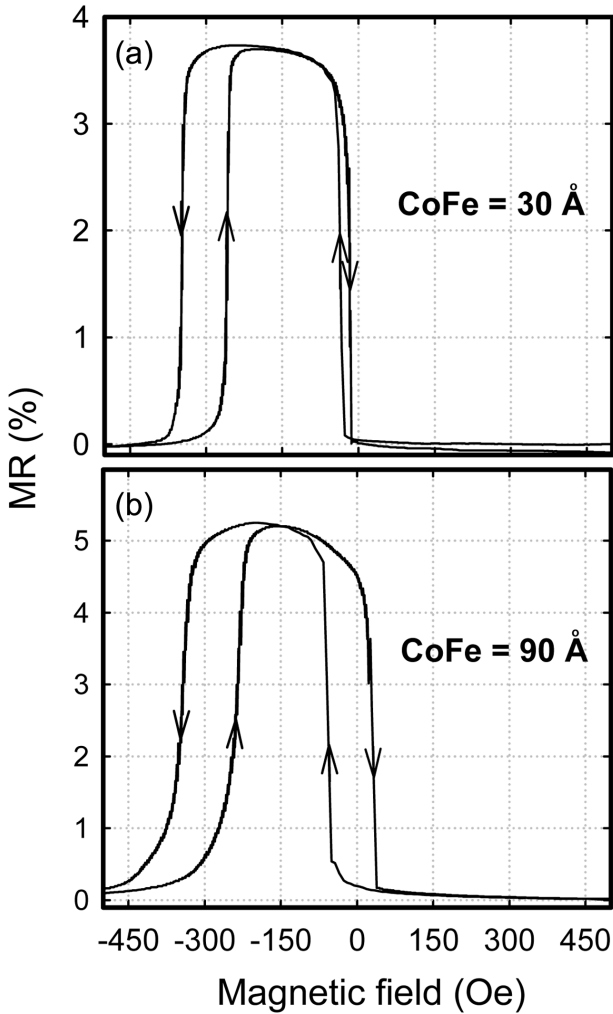
Fig. 1은 Glass/Ta(80 Å)/CoFe(75 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å)/Ta(40 Å) 다층박막에 대하여 전형적인 GMR-SV major(Fig. 1(a))와 minor(Fig. 1(b)) 자기저항곡선에서 정의한 측정값들을 나타내었다. CoFe/Cu/CoFe/IrMn GMR-SV 박막에서 IrMn 층 두께가 80 Å 일 때, 서로 샌드위치구조를 이루고 있는 비자성체 Cu 층을 사이에 둔 강자성체 상·하부 CoFe 층들 간의 상호교환결합력( $H_{int}$ )은 13 Oe 이었다. 반강자성체 IrMn 층에 고정된 CoFe 층의 보자력( $H_{pc}$ )과 교환결합세기( $H_{pex}$ )는 각각 72 Oe, 255 Oe 인 자기저항 특성을 보여 주었다. 반면에 자유층 CoFe의 보자력( $H_c$ )은 27 Oe를 유지하였으며, 4단자 표면자기저항( $R_s$ ), 자기저항비(MR), 자장감



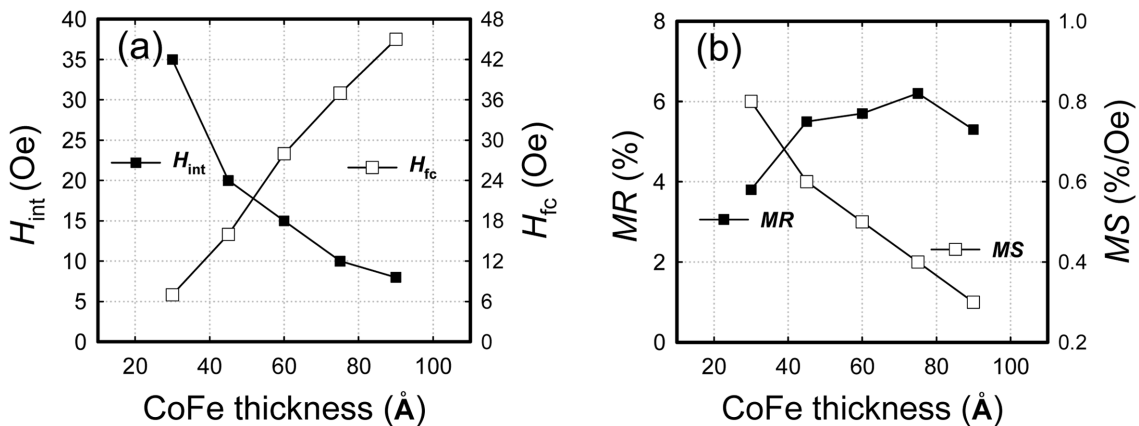
**Fig. 1.** GMR-SV (a) major and (b) minor curves for the Glass/Ta(80 Å)/CoFe(75 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å)/Ta(40 Å): (a) Exchange coupling field ( $H_{pex} = 255$  Oe), coercivity ( $H_{pc} = 72$  Oe) of pinned CoFe/IrMn bilayer, and surface resistance ( $R_s = 37.2 \Omega$ ), (b) interlayer coupling field ( $H_{int} = 13$  Oe), coercivity ( $H_{fc} = 27$  Oe) of free CoFe layer, magnetic resistance ratio ( $MR = 6.2 \%$ ), and magnetic sensitivity ( $MS = 0.8 \%/Oe$ ) are measured by 4-probe method.

응도(MS)는 37.2 O, 6.2 %와 0.8 %/Oe로 나타났다.

Fig. 2는 [CoFe(t)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV 다층박막에 대하여 자유층 CoFe의 두께가 30 Å, 90 Å 일 때 측정된 자기저항곡선이다. 자유층의 두께가 증가할수록 보자력이 감소하는 것과 달리 오히려 보자력이 7 Oe에서 45 Oe 로 증가하는 현상을 보여 준다. 자유층 CoFe의 두께가 90 Å 일 때보다 30 Å 일 때 보자력의 감소는 자장감응도를 0.3 %/Oe에서 0.8 %/Oe로 증가시켰다. 자기저항비는 CoFe 층 두께가 증가함에 따라 3.8 %에서 5.3 %로 증가하였다. 한편 두께 증가에 대한 4 단자 표면 자기저항은 50.4 Oe에서 33.4 Oe 으로 감소하여 누설전류에 의한 자기저항비 감소효과를 보이지 않았다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)은 자유층 CoFe의 두께가



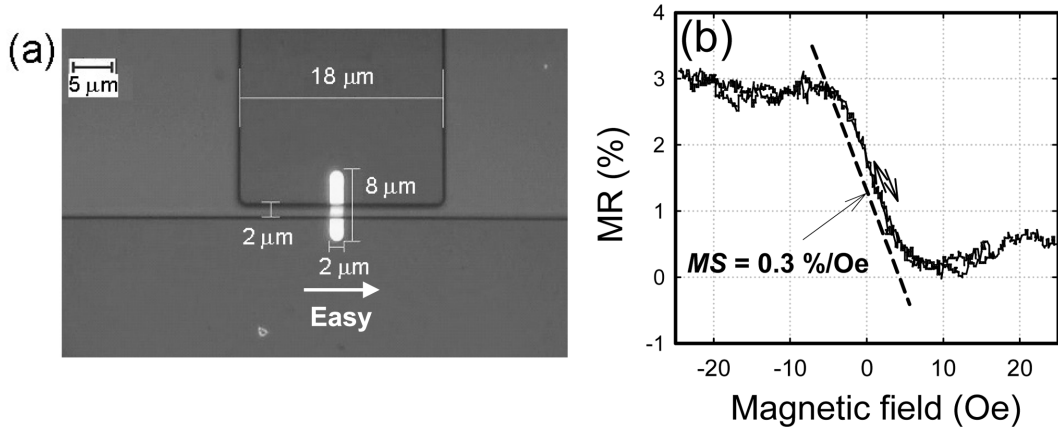
**Fig. 2.** MR curves for Glass/Ta(80 Å)/CoFe(t)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å)/Ta(40 Å) multilayer; (a)  $t = 30 \text{ \AA}$  and (b)  $t = 90 \text{ \AA}$ . The increase of thickness of free CoFe layer did resulted in the increase of coercivity ( $H_c$ ) and the decrease of magnetic sensitivity ( $MS$ ).



**Fig. 3.** The thickness dependence of free CoFe layer  $H_{fc}$ ,  $H_{int}$ , MR, and MS for CoFe( $t = 30 \text{ \AA}, 45 \text{ \AA}, 60 \text{ \AA}, 75 \text{ \AA}, 90 \text{ \AA}$ )/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV multilayer: (a) coercivity ( $H_{fc}$ ) and interlayer coupling field ( $H_{int}$ ) of free CoFe layer, (b) magnetoresistance ratio (MR) and magnetic sensitivity (MS).

30 Å, 45 Å, 60 Å, 75 Å, 90 Å 일 때 측정된 Fig. 1 형태의 자기저항곡선으로부터 얻어진 고정층 CoFe의 교환결합세기( $H_{px}$ ), 고정층의 보자력( $H_{pc}$ ), 자유층 CoFe의 보자력( $H_{fc}$ ), 상호교환결합력( $H_{int}$ ), 4단자 자기저항비(MR), 자장감응도(MS)을 정리한 그림이다.

CoFe( $t = 30 \text{ \AA}, 45 \text{ \AA}, 60 \text{ \AA}, 75 \text{ \AA}, 90 \text{ \AA}$ )/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV 다층박막에 대하여 자유층의 보자력, 고정층과 자유층간의 교환결합세기를 Fig. 3(a)에 나타내었다. CoFe 두께가 15 Å씩 증가할수록 고정층과 자유층간의 교환결합세기는 약 7.5 Oe 비율로 감소하였고 보자력은 5 Oe 비율로 증가하였다. 반면에 고정층의 교환결합세기와 보자력은 270 Oe~300 Oe와 40 Oe~60 Oe 근방의 값을 유지하였다. 이러한 결과로 볼 때, IrMn-CoFe GMR-SV 구조에서 자유층 CoFe의 두께의 감소가 오히려 연자성 특성을 향상시키는 것으로 사료된다. 반강자성체 IrMn은 강자성체 CoFe 층과의 계면에서 교환결합력을 유도하여 고정시키지만, 비자성체 Cu 두께를 조절하여 상호교환결합을 자유층 CoFe에 영향을 주게 된다. 이러한 결과는 1~2 μm 이내의 자성비드(magnetic bead)를 생체분자에 삽입하여 비드의 초자성 잔류자화를 분별할 수 있는 0.5%/Oe 정도의 자장감응도를 갖는 GMR-SV 바이오소자로 활용이 가능한 연자성 특성에 간접적으로 관여한다고 볼 수 있다. Fig. 3(b)는 CoFe( $t = 30 \text{ \AA}, 45 \text{ \AA}, 60 \text{ \AA}, 75 \text{ \AA}, 90 \text{ \AA}$ )/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV 다층박막에 대하여 자유층 CoFe의 두께에 따른 MR, MS 값을 나타내었다. CoFe 두께가 15 Å씩 증가할수록  $R_s$ 는 3 Ω~4 Ω의 값으로 감소하였지만, MR는 0.5%~1.0% 비율로 증가하다가 90 Å 일 때는 누설전류로 인한 MR이 5.3%로 감소하였다. 또한 CoFe 두께가 15 Å씩 감소할수록 MS는 0.1%/Oe~0.2%/Oe 씩 증가하였다. 자유층 CoFe 두께가 30 Å



**Fig. 4.** (a) Photo of micro-patterned  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$  GMR-SV device with 2-probe electrode. (b) Minor MR curve measured by 2-probe method. When the sensing current was  $10 \mu\text{A}$ , the output working voltage uniformly increased from 2.7 mV. The magnetic sensitivity was 0.3 %/Oe. The some fluctuation and asymmetric curve of MR output signal may be considered by covered magnetic pattern gap in (a).

일 때는 Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 최대 자장감응도를 보였다. 즉, 자유층 CoFe 두께에 따른 보자력의 크기가 감소하는 연자성 특성으로 인해 자장감응도는 증가함으로써 GMR-SV 바이오센서로서의 활용 가능성을 보여 주었다.

Fig. 4(a)은 CoFe(30 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV 다층박막을 광 리소그래피 공정으로 제작한 GMR-SV 소자의 실제 사진을 나타낸 것이다. 증착시 인가한 자기장 용이축 방향을 소자의 길이방향으로 하여 형상자기이방성 효과가 나타나도록 소자 크기인  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$ 의 PR 영역을 남기고 ECR Ar 이온 밀링으로 식각을 하였다. 소자를 밀링 후 아세톤으로 PR 을 제거하고 다시 리소그래피 lift-off 방식으로  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 의 실제 영역만 남게 Cu(500 Å) 전극을 형성하였다. Fig. 4(a)에서 Cu 전극으로 덮은 부분을 제외한 미세 패터닝된  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  모양과 용이축 방향을 표시하였다. 실제 GMR-SV 소자 그림으로부터 Cu 전극이 코팅된 GMR-SV 소자가 2 μm의 길이 차이와 전극간의 gap이 형성된 자성패턴 차이로 인해 MR 신호의 불안정성과 비대칭적인 특성을 Fig. 4(b)에서 보여 주었다. Fig. 4(b)는 미세 패터닝 후 IrMn 기저로 한 GMR-SV 다층박막 소자를 2단자 법으로 얻은 자기저항 minor 곡선이다. 증착시 형성된 일축 이방성인 미세 패터닝의 용이축 방향으로 측정시 외부자기장을 인가하여 동일한 센싱전류 방향축으로 하여 측정하였다. 허부 자유층 CoFe과 상부 고정층 CoFe/NiFe 사이의 상호결합력과 보자력은 거의 0 Oe 근방 값으로 패터닝 전의 값들과 비교할 때 감소하였다. 이러한 현상은 측정시 내부저항보다는 표면저항이 포함된 2단자 저항값이 50 Ω에서 270 Ω로 증가하였으며, 리소그래피 soft와 hard baking 공정시 공기 중에서 90 °C와 110 °C의 열적 효과와 PR 도포 후 자유층의 표면 손상으로

인한 것으로 사료된다. Fig. 4(b)에서 용이축 방향 얻은 자기 저항곡선의 minor loop로부터 패터닝 소자의 연자성 특성을 보여준 Fig. 2(a)와 달리 자유층 CoFe의  $H_{im}$ 과  $H_c$ 의 값은 각각 0 Oe, 0 Oe로 감소한 반면에, MR과 MS의 값은 각각 3.0 %와 0.3 %/Oe로 다소 감소하였다. 이러한 결과는 CoFe/Cu/CoFe/IrMn 다층구조를 가진 GMR-SV 바이오센서 소자로서의 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

Glass/Ta/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta GMR-SV 다층박막에 대하여 자유층 CoFe 두께에 따른 상호교환결력, 교환결합세기, 보자력, 자기저항비, 자장감응도의 자기저항 특성을 조사하였다. CoFe(t)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) GMR-SV 다층박막은 자유층 CoFe 두께  $t = 30 \text{ Å}$ 일 때 가장 작은 보자력과 높은 자장감응도를 갖는 연자성 특성을 보였다. 반면에 두께  $t = 90 \text{ Å}$ 일 때 큰 보자력과 낮은 자장감응도를 보였다. 양호한 연자성 특성을 갖은 CoFe(30 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) 다층박막을 광 리소그래피 공정으로  $2 \times 8 \mu\text{m}^2$  크기의 GMR-SV 소자를 제작하였다. 길이방향의 센싱전류와 폭방향의 고정층의 용이축 방향을 설정하여 2단자법으로 얻은 소자의 연자성 자기저항 특성인 자기저항비( $MR = 3.0 \%$ )와 자장감응도( $MS = 0.3 \%$ /Oe)는 GMR-SV 바이오센서 소자로서의 활용 가능성을 보여주었다.

## 감사의 글

본 연구는 2007~2008년도 상지대학교 교내연구비 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

[1] C. Anifensen, Science, **181**, 223 (1973).  
 [2] D. A. Baker, Nature, **405**, 39 (2000).  
 [3] J. H. Lee, D. W. Kim, M. J. Kim, G. S. Park, J. H. Kang, and S. S. Lee, J. Kor. Magn. Soc. (Korean), **18**, 174 (2008).  
 [4] G. Li, S. Sun, R. J. Wilson, R. L. White, N. Pourmand, and S. X. Wang, Sens. Actu. A, **126**, 98 (2006).  
 [5] D. L. Graham, H. A. Feliciano, P. P. Freitas, L. A. Clarke, and M. D. Amaral, Sens. Actu. B, **107**, 936 (2005).  
 [6] S. H. Park, K. S. Soh, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, J. Magnetism, **13**, 30 (2008).  
 [7] S. W. Kim, Y. G. Choi, H. S. Lee, D. H. Park, D. G. Hwang, S. S. Lee, G. W. Kim, S. G. Lee, and S. J. Lee, J. Appl. Phys., **99**, R908 (2006).  
 [8] S. H. Park, K. S. Soh, M. C. Ahn, D. G. Hwang, and S. S. Lee, J. Kor. Magn. Soc. (Korean), **16**, 157 (2006).  
 [9] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, J. Magnetism, **14**, 18 (2009).

**Soft Magnetic Property Depending on thickness of Free Layer  
 in CoFe/Cu/CoFe/IrMn Spin Valve Film**

**Jong-Gu Choi<sup>1</sup>, In-Suk Go<sup>2</sup>, Yu-Mi Gong<sup>2</sup>, Min-Ho Kim<sup>2</sup>, Young-Suk Park<sup>1</sup>,  
 Do-Guwn Hwang<sup>1,2</sup>, and Sang-Suk Lee<sup>1,2\*</sup>**

*<sup>1</sup>Department of Oriental-western Biomedical Engineering, Graduation, <sup>2</sup>Department of Oriental Biomedical Engineering,  
 Sangji University, Wonju 220-702, Korea*

(Received 9 April 2009, Received in final form 14 April 2009, Accepted 16 April 2009)

Interlayer coupling field, coercivity, magnetoresistance ratio, and magnetic sensitivity depending on the thickness of free CoFe layer for the CoFe/Cu/CoFe/IrMn multilayer are investigated. In case of CoFe layer of 30 Å thickness for the CoFe(t)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) multilayer with ferromagnet/non-magnet/ferromagnet structure induced by IrMn layer, the lowest coercivity and the highest magnetic sensitivity, which is contained soft magnetic property, are observed. On the other side, in case of CoFe layer of 90 Å thickness, there are the highest coercivity and the lowest magnetic sensitivity. The fabricated CoFe(30 Å)/Cu(25 Å)/CoFe(60 Å)/IrMn(80 Å) spin valve device with 2 × 8 μm<sup>2</sup> patterning size are measured by two probe method, which is selected the sensing current as the longitudinal direction and the easy axis as the transversal direction. The measuring magnetoresistance ratio and magnetic sensitivity of GMR-SV device having the soft magnetic property are 3.0 % and 0.3 %/Oe, respectively.

**Keywords :** free layer CoFe, soft magnetic property, magnetic sensitivity, IrMn-CoFe GMR-SV device