

Analysis of Magnetic Isotropy Property using Magnetoresistance Curve of CoFe/Cu/CoFe/PtMn Multilayer Film

Jong-Gu Choi, Su-Hee Kim, Sang-Heon Choi, and Sang-Suk Lee*

Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

Jang-Roh Rhee

Department of Nanophysics, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Korea

(Received 17 July 2017, Received in final form 9 August 2017, Accepted 10 August 2017)

The magnetic isotropy property from the magnetoresistance (MR) curve and magnetization (MH) loop for the PtMn based spin valve (SV) multilayer films fabricated with different the bottom structure after post-annealing treatment was investigated. The exchange biased coupling field (H_{ex}), coercivity (H_c), and MR ratio of Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(4 nm) SV multilayer film without antiferromagnetic PtMn layer are 0 Oe, 25 Oe, and 3.3 %, respectively. MR curve for the Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(4 nm) SV multilayer film showed $H_{ex} = 2$ Oe, $H_c = 316$ Oe, and MR (%) = 4.4 % with one butterfly MR curve having by the effect of antiferromagnetic PtMn layer. MR curve for the dual-type Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/CoFe(3 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(6 nm)/Ta(4 nm) SV multilayer film showed $H_c = 37.5$ Oe and 386 Oe, MR = 3.5 % and 6.5 % with two butterfly MR curves and square-like hysteresis MH loops. The anisotropy property in CoFe spin valve-PtMn multilayer is neglected by the effects of a very small value of H_{ex} and a very slightly shape magnetic anisotropy. This result is possible to explain the effect of magnetization configuration spin array of the bottom SV film and the top SV film of PtMn layer.

Keywords : coercivity, CoFe/Cu/CoFe spin valve, PtMn, magnetic hysteresis curve, dual-type multilayer

CoFe/Cu/CoFe/PtMn 다층박막의 자기저항 곡선을 이용한 자기 등방성 특성 분석

최종구 · 김수희 · 최상헌 · 이상석*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시, 26339

이장로

숙명여자대학교 나노물리학과, 서울 청과구, 04310

(2017년 7월 17일 받음, 2017년 8월 9일 최종수정본 받음, 2017년 8월 10일 게재확정)

PtMn계 스핀밸브(Spin Valve, SV) 다층박막의 하부층 구조를 달리하여 제작된 시료를 열처리 후 측정된 자기저항(magnetoresistance, MR) 곡선과 자기이력 곡선(MH loop)으로부터 얻은 등방성의 자기적 특성을 조사하였다. PtMn층이 없는 스핀밸브 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선에서 얻은 교환결합력(H_{ex}), 보자력(H_c), 자기저항비(MR(%))는 각각 0 Oe, 약 25 Oe, 3.3 %이었다. Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선에서 반강자성체인 PtMn 박막으로 나타낸 효과로 하여금 나비 날개 형태로 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 2 Oe, 316 Oe, 4.4 %이었다. 반강자성체인 PtMn층이 중간층으로 삽입된 이중 GMR-SV 다층박막으로 측정된 MR 곡선과 MH loop에서 얻은 H_c 는 각각 37.5 Oe과 386 Oe이었으며, MR(%)는 각각 3.5 %와 6.5 %로 2개의 히스테리시스에서 사각비가 뚜렷하게 대칭적으로 나뉘어 자기적 특성을 나타내었다. PtMn계 CoFe 스핀밸브 박막의 매우 작은 H_{ex} 값과 미미한 형상이방성을 갖는 효과

로 하여금 비등방성을 갖는 자기적 특성을 잃게 되었다. 이러한 결과는 PtMn 박막의 하부층과 상부층에 있는 SV 다층박막에서 각 강자성체의 자화 스핀배열로 일어나는 효과를 나타내었다.

주제어 : 보자력, CoFe/Cu/CoFe 스핀밸브, PtMn, 자기이력 곡선, 이중 다층박막 구조

I. 서 론

자기 정보저장기술의 고도화를 위해 사용되는 재생전용헤드는 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve; GMR-SV) 박막으로 이루어져 있다. 과거 십년간 고감도 GMR-SV 박막소자는 생체신호를 측정하는 센서로 활용되고 있다. GMR-SV형 바이오 소자는 수 μm ~ 수십 μm 이내의 크기와 수백 nm의 얇은 두께로 제작하여 개발되고 있다 [1]. 이에 대한 열적 안정성이 우수한 GMR-SV 다층박막 구조의 형성이 필요하다. GMR-SV 다층박막 구조에서 강자성체와 교환바이어스 결합으로 고정층의 역할을 하는 반강자성체로는 NiO, FeMn, IrMn, PtMn이 있다[1-4]. 그 중에서 우수한 내식성과 높은 교환 이방성을 갖는 IrMn계 스핀밸브 구조가 전형적으로 많이 사용되고 있다[2, 3].

IrMn계와 마찬가지로 PtMn계 스핀밸브 구조는 우수한 내식성과 높은 교환 이방성뿐만 아니라 열적 거침(thermal asperity)이 낮아 안정성이 우수하다. 또한 소자 공정 시 발생하기 쉬운 정전기 방전 특성이 IrMn계 스핀밸브보다 우수한 것으로 보고되어 있다[3-5]. PtMn계 스핀밸브 다층박막은 상온에서 각 다층박막을 비정렬된(disordered) 면심입방(face centered cubic) 격자 구조로 적층하여 균일한 자기장 하에서 고온으로 반드시 열처리한 후 해야만 정렬된(ordered) 면심정방(face centered tetragonal) 격자 구조로 천이함으로써 박막 면상으로 일축 교환 이방성을 나타나게 된다[6-8]. 기판 위에 적층되는 Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta 다층박막 구조가 전형적인 PtMn계 스핀밸브 다층박막 구조이다. 자기장 하에

서 고온으로 열처리한 후 PtMn층 하부에 적층된 다층박막의 정렬구조에 의존하는 결정구조 때문에 교환 이방성을 갖는 효과로 자기적 특성이 민감한 형태를 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 PtMn계 스핀밸브에서의 하부층 구조를 달리하여 제작된 시료를 열처리한 후 적층된 다층박막을 구조적 정렬로 유도하였다. 다층박막의 시료에 자화 곤란축과 자화 용이축에 따라 4단자법으로 측정된 자기저항(magnetoresistance; MR) 곡선으로부터 자기 이방성과 자기 등방성을 갖는 자기적 특성을 조사하였으며, MR 곡선과 대응시킨 자기이력 곡선(MH loop)을 분석하여 강자성체 층간의 자화배열에 따른 자기저항 변화에 대한 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

4가지 유형으로 Type A의 Ta(bottom)/CoFe/PtMn/Ta(top) 이중박막, Type B의 Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/Ta(top) 스핀밸브 다층박막, Type C의 Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta(top) 단일 PtMn계 GMR-SV 다층박막, Type D의 Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/CoFe/Cu/CoFe/Ta(top) PtMn계 이중 GMR-SV 다층박막을 Fig. 1에 나타내었다. 다층박막 시료는 챔버의 진공도가 2.5×10^{-6} Torr인 DC 마그네트론 스퍼터링(DC magnetron sputtering) 시스템을 이용하여 코닝 유리(Corning 7059) 기판 위에 상온에서 각각 제작하였다[9, 10]. GMR-SV 다층박막 시료를 상온에서 제작할 때 인가되는 균일한 자기장의 크기는 영구자석을 이용하여 350 Oe를 유지하였다. 직경 3인치 크기의 Ta, CoFe, Cu와 2인치 크기의

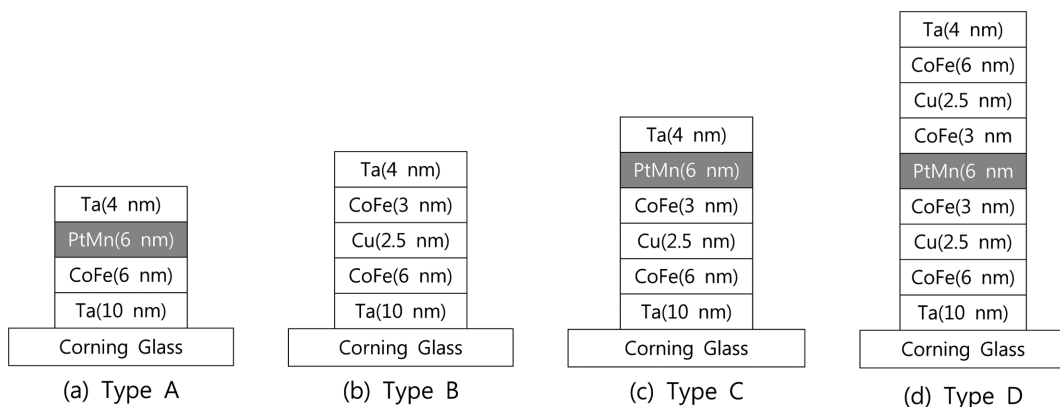


Fig. 1. Schematic structure of one CoFe/PtMn bilayer ((a) Type A) and three different types ((b) Type B, (c) Type C, and (d) Type D) of CoFe/Cu/CoFe SV multilayer without or with antiferromagnetic PtMn layer.

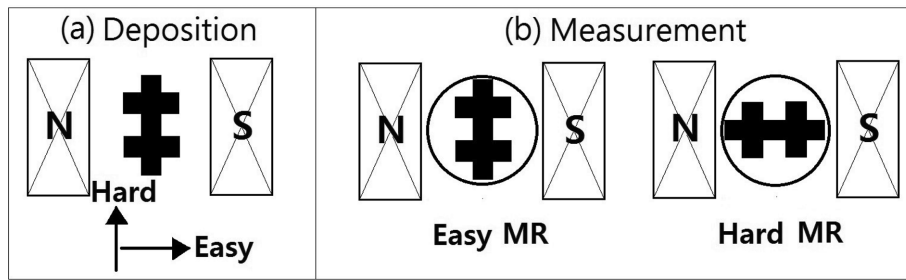


Fig. 2. Schematic of the easy and hard axis direction for the applied magnetic field under (a) multilayer deposition and post-annealing treatment, and (b) MR measurement.

PtMn으로 4개의 각 타겟에서 DC 마그네트론 스퍼터링 증착 시 형성되는 플라즈마의 상호 간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 막기 위해 스테인레스 판 분리막이 사용되었다[11, 12]. 합금형 강자성체로 CoFe 타겟의 원자 성분비(atomic ratio)와 반강자성체로 PtMn 타겟의 무게 성분비(weight ratio)는 각각 81 : 19와 50 : 50이었다. Ta, CoFe, Cu, PtMn의 박막에 대한 증착률은 각각 0.1 nm/s, 0.15 nm/s, 0.12 nm/s, 0.1 nm/s 이었다. 모든 다층박막 구조를 이루는 바닥층의 Ta, 자유층의 CoFe, 고정층의 CoFe, 반강자성층의 PtMn, 보호층의 Ta별로 두께를 각각 10 nm, 6 nm, 3 nm, 6 nm, 4 nm으로 설정하였다. GMR-SV 구조에서 반강자성체인 PtMn 박막과 교환결합한 고정층으로 강자성체인 CoFe 박막과 자유층으로 강자성체인 CoFe 박막 사이에 2.5 nm 두께의 Cu 박막을 증착하였다.

Fig. 2(a)와 같이 시료 홀더의 양끝에 장착된 영구자석으로 만든 350 Oe의 균일한 자기장 하에서 0.1 mm 두께의 구리판 금속 그림자 마스크(shadow mask)를 이용하여 4단자법으로 자기저항을 측정하기 위한 다층박막 박막 시료를 증착하였다. 4단자 측정을 위해 패터닝된 GMR-SV 다층박막의 폭(width)과 길이(length)를 각각 0.5 mm과 5 mm의 크기가 되게 하였다 [13, 14]. 패터닝된 GMR-SV 다층박막은 진공 상에서 열처리한 후 증착 시 인가한 자기장과 동일한 350 Oe으로 일방향 자기 이방성을 유도하였다. Fig. 2(b)는 박막의 폭 방향을 자화 용이축으로 하고 길이 방향을 자화 곤란축으로 설정하였다[13]. 히터용 할로겐 램프 위의 구리판 블록 안에 박막 시료를 넣어 설정온도를 275 °C으로 1시간 동안 열처리한 후 상온까지 내렸다.

4단자 자기저항 측정 시스템을 이용하여 외부 자기장의 세기에 따른 Major MR 곡선을 측정하였다. GMR-SV 다층박막 시료의 박막 면에 수평 방향으로 외부 자기장을 인가하여 4단자로 전류와 전압을 측정하여 자기저항을 얻었다. 자화 용이축 방향으로 측정된 MR 곡선을 통해 GMR-SV 다층박막 시료의 교환결합력, 보자력, 자기저항비를 각각 얻었다[13, 14]. 또한 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 용이축 방향에서 측정된 MR 곡선과 비교 분석하여 자기 이방성과

자기 등방성을 갖는 자기적 특성을 조사하였다.

III. 실험결과 및 토의

4가지 유형의 박막 시료를 진공 상 자기장 하에서 275 °C으로 1시간 열처리한 후 4단자법으로 자화 용이축 방향으로 측정된 자기저항(MR) 곡선을 각각 Fig. 3(a), 3(b), 3(c), 3(d)으로 나타내었다. Fig. 3(a)는 이중 CoFe/PtMn 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선이다. 반강자성체인 PtMn 박막이 교환 자기 이방성의 효과를 갖지 않은 상태에서 얻은 교환결합력(exchange biased coupling field, H_{ex})과 보자력(coercivity, H_c)은 각각 0 Oe와 약 132 Oe으로 이는 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 4(a)와 같은 결과를 보여 주었다.

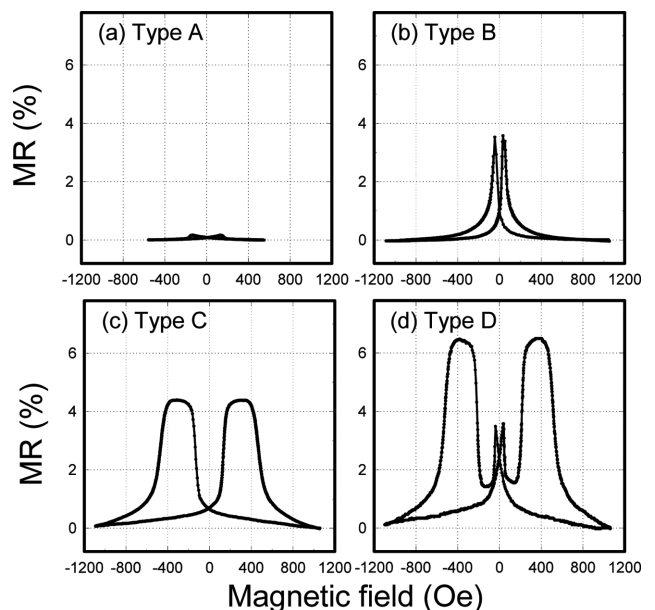


Fig. 3. Major MR curves according to the easy axis for four types ((a) Type A, (b) Type B, (c) Type C, and (d) Type D) after post-annealing treatment.

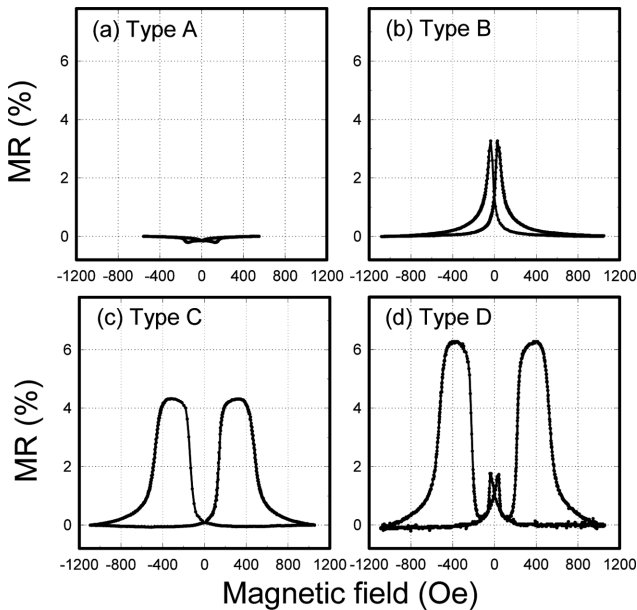


Fig. 4. Major MR curves according to the hard axis for four types ((a) Type A, (b) Type B, (c) Type C, and (d) Type D) after post-annealing treatment.

Fig. 3(b)는 반강자성체를 기반으로 하지 않고 이뤄진 스핀밸브 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선이다. 반강자성체인 PtMn 박막이 교환 자기 이방성을 갖지 않은 상태에서 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 5 Oe, 약 49 Oe, 3.5%로 이는 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 4(b)와 같이 동일한 결과를 보여주었다.

그리고 Fig. 3(c)는 반강자성체를 기반으로 하고 이뤄진 GMR-SV 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선이며, 반강자성체인 PtMn 박막으로 나타낸 효과로 하여금 나비 날개 형태에서 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 2 Oe, 약 316 Oe, 4.4%로 이는 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 4(c)와 같이 동일한 결과를 보여주었다.

Fig. 3(d)는 반강자성체를 기반으로 하고 이뤄진 이중 GMR-SV 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/CoFe(3 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(6 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선이며, 이중 GMR-SV 다층박막 구조의 중간층으로 삽입된 반강자성체인 PtMn 박막에서의 효과로 하여금 이중 나비 날개 형태에서 얻은 H_{ex} 는 0.5 Oe와 10 Oe, H_c 는 약 37.5 Oe와 386 Oe, MR(%)는 3.5%와 6.5%의 2가지 값으로 이는 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 4(d)와 같은 동일한 결과를 보여주었다.

한편 4가지 유형의 박막 시료를 Fig. 3(a), 3(b), 3(c), 3(d)

에서 각각 자화 용이축 방향으로 측정된 MR 곡선과 비교하기 위하여 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 Fig. 4(a), 4(b), 4(c), 4(d)에 나타내었다. Fig. 4(a)는 Fig. 3(a)와 달리 박막을 적층하여 생긴 패턴 모양에 따른 MR 곡선이 반대로 나타났지만 이방성 자기저항(anisotropy magnetoresistance; AMR)에 의한 특성으로 보이며, Type A에서는 작은 MR 신호가 나타나게 되므로 형상 이방성을 갖는 자기적 특성을 잃게 된다. H_c 는 자화 용이축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 3(a)에서의 값과 같은 132 Oe이었다.

스핀밸브 다층박막 구조를 갖는 3가지 박막 시료에 대한 MR 곡선은 형상 자기 이방성의 효과보다는 Cu층과 위 아래로 분리된 각 강자성층들 간의 스핀의존 산란 효과가 우세하게 된다. 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선의 Fig. 4(b), 4(c), 4(d)는 자화 용이축 방향으로 측정된 MR 곡선을 나타낸 Fig. 3(b), 3(c), 3(d)에서 언급한 H_{ex} , H_c , MR(%)가 거의 동일한 값을 보여주었다. 반강자성체인 PtMn 박막을 기반으로 하여 이루어진 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성은 자화 용이축과 자화 곤란축으로 측정된 방향과 상관없이 자기 등방성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 자화 용이축과 자화 곤란축이 아닌 45° 일 때도 같은 결과의 MR 곡선이 0°에서 360°까지 자기 등방성에 대한 특성을 유지하고 있었다.

자기 등방성을 갖는 이중 GMR-SV 다층박막에 대하여 Fig. 3과 Fig. 4에서 나타낸 MR 곡선을 MH loop로 변환하여 Fig. 5(a), 5(b), 5(c)에 나타내었다. 여기서 MR 곡선을 사용하여 MH loop로 변환하는 과정은 다음과 같다. MR 곡선의 X축 +1200 Oe에서 시작하여 0을 지나 음(-)의 부분에서 MR 최대값까지 포함한 첫 번째 곡선과 -1200 Oe에서 시작하여 0을 지나 (+) 부분에서 MR 최대값부터 +1200 Oe까지 포함한 두 번째 곡선을 각각의 Y축 MR 최대값에 기준을 두어 첫 번째와 두 번째 MR 곡선 부분을 180° 대칭을 시켜 MH loop를 얻게 된다[15, 16]. 반강자성체인 PtMn 박막이 없는 단순한 스핀밸브 다층박막에 대하여 Fig. 5(a)의 MH loop에서 얻은 H_c 는 49 Oe으로 히스테리시스에서 사각비가 뚜렷한 형태를 나타내었다. 반강자성체인 PtMn 박막이 있는 단일 GMR-SV 다층박막에 대하여 Fig. 5(b)의 MH loop에서 얻은 H_c 는 316 Oe으로 히스테리시스에서 사각비가 뚜렷하게 대칭적으로 2개의 형태를 나타내었다. 여기서 분리된 상태로 마치 교환결합 이방성을 갖고 있는 것으로 보이지만 나비 날개 형태의 MR 곡선으로 Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에서는 실제로 H_{ex} 가 일어나지 않았다.

반강자성체인 PtMn 박막이 중간층으로 삽입된 이중 GMR-SV 다층박막에 대하여 Fig. 5(c)의 MH loop에서 보여준 H_c 는 386 Oe으로 히스테리시스에서 사각비가 뚜렷하게 대칭적

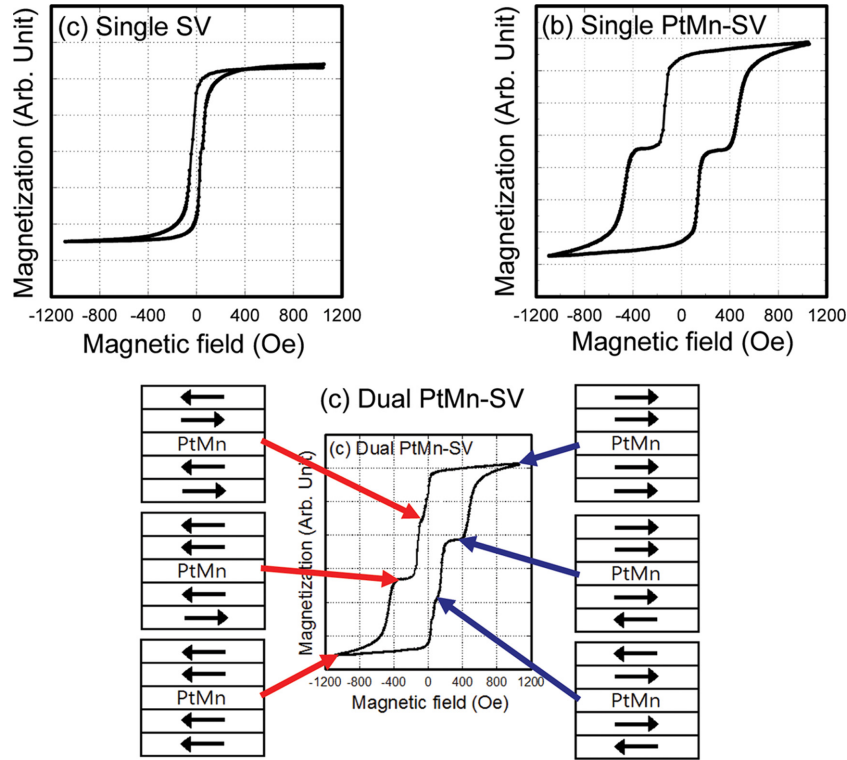


Fig. 5. (Color online) Two different MH loops for (a) the spin valve multilayer and (b) the single-type GMR-SV multilayer with PtMn corresponding to integrated MH loop for (c) the dual-type CoFe/Cu/CoFe/PtMn/CoFe/Cu/CoFe GMR-SV multilayer. Arrows of inset in Fig. 5(d) are the spin configuration of each ferromagnetic layer in dual-type PtMn GMR-SV multilayer.

Table I. Magnetic properties (H_{ex} (Oe), H_c (Oe), MR (%), magnetic isotropy) of two single-type SV multilayers and one dual-type SV multilayer without or with top and bottom PtMn layers. Here 1st and 2nd are notations of the bottom SV and the top SV in case of dual-type PtMn based GMR-SV multilayer film, respectively.

Sample	Annealing temperature (°C)	Exchange biased coupling field H_{ex} (Oe)		Coercivity H_c (Oe)		MR (%)		Magnetic isotropy
		1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	
Type B (Single SV)	275	0	-	49	-	3.5	-	○
Type C (Single SV with PtMn)	275	2	-	316	-	4.4	-	○
Type D (Dual SV with PtMn)	275	10	0.5	386	37.5	6.5	3.5	○

으로 2개의 형태를 나눠져 나타내었지만 중심에서 또 하나의 H_x 가 37.5 Oe으로 사각비가 뚜렷한 히스테리시스를 나타내고 있다. 물론 단일 GMR-SV 다층박막 구조에서 나타낸 바와 같이 이중 GMR-SV 다층박막 구조에서도 H_{ex} 가 일어나지 않는 MH loop를 확인할 수 있었다. 중앙에서 일어난 H_x 가 작은 MH loop로 나타낸 히스테리시스는 PtMn 박막의 상부층에 있는 스핀밸브 다층박막에서 효과를 보여주었다. 그리고 중앙을 벗어나 일어난 H_x 가 큰 MH loop로 나타낸 히스테리시스는 Fig. 3(d)와 Fig. 4(d)에서 보여준 PtMn 박막의 하부층에 있는 스핀밸브 다층박막에서 자기적 특성을 갖는 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(c)에서 강자성체인 CoFe층을 표시한 화살표는 반강자성체인 PtMn 박막을 중간으로 하여 하부

층 스핀밸브 다층박막과 상부층 스핀밸브 다층박막에 따라 변환된 각 강자성체의 자화 스핀배열을 나타낸 것이다. 각 강자성체인 CoFe층의 스핀배열들이 반평행일 때 MR(%)는 최대값을 가지고 평행일 때 최소값을 보여주었다.

Table I는 반강자성체인 PtMn 박막이 없는 단순한 스핀밸브 다층박막과 반강자성체인 PtMn 박막이 있는 GMR-SV 다층박막을 구별하여 3가지 유형으로 CoFe/Cu/CoFe 다층박막의 단일 스핀밸브 구조와 이중 GMR-SV 구조를 갖는 자기적 특성에 대하여 측정된 MR 곡선에서 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)의 결과를 요약한 것이다. 반강자성체인 PtMn층과 강자성체인 CoFe층에서 자기 이방성의 H_{ex} 는 유도하지 않고 모든 박막 구조는 자기 등방성을 유지하고 있었다.

IV. 결 론

PtMn계 스핀밸브 다층박막에서 하부층 구조를 달리하여 제작된 시료를 열처리한 후 이로 자기 이방성이 아닌 자기 등방성을 갖는 자기적 특성을 MR 곡선으로 측정하여 조사하였다. 또한 자기이력 곡선을 분석하여 층간의 자화 스핀배열로 일어나는 효과에 대하여 설명하였다. 반강자체인 PtMn층이 없는 순수한 스핀밸브 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선에서 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 0 Oe, 49 Oe, 3.5 %의 값을 보여주었다. 그리고 반강자성체의 PtMn 박막이 삽입된 GMR-SV 구조의 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(4 nm) 다층박막으로 측정된 MR 곡선에서 반강자성체인 PtMn 박막으로 나타낸 효과로 하여금 나비 날개 형태로 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 2 Oe, 316 Oe, 4.4 %의 값을 보여주었다.

반강자성체인 PtMn 박막이 중간층으로 삽입된 이중 GMR-SV 다층박막으로 MR 곡선과 MH loop에서 얻은 H_c 와 MR(%)는 각각 386 Oe과 6.5 %로 히스테리시스에서 사각비를 뚜렷하게 대칭적으로 2개의 형태로 나누어 자기적 특성을 나타내었지만 중심에서 또 하나의 H_c 와 MR(%)는 각각 37.5 Oe과 3.5 %으로 히스테리시스에서 사각비를 뚜렷하게 나타내었다. PtMn계 CoFe 스핀밸브 박막의 매우 작은 H_{ex} 값과 미미한 형상 이방성의 효과로 하여금 비등방성을 갖는 자기적 특성을 잃게 되었다. 반강자성체인 PtMn 박막의 하부층에 있는 스핀밸브 다층박막에 대한 자기적 특성을 각 강자성체의 자화 스핀배열로 일어나는 효과를 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단(NRF)

의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2016R1D1A1B03936289)의 결과이다.

References

- [1] M. D. Cubells-Beltrán, C. Reig, J. Madrenas, A. D. Marcellis, J. Santos, S. Cardoso, and P. P. Freitas, *Sensors* **16**, 939 (2016).
- [2] S. X. Wang and A. M. Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, Academic Press, San Diego (1991) Chap. 6, pp. 123~176.
- [3] M. J. Kim, H. J. Kim, and K. Y. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **11**, 72 (2001).
- [4] S. H. Huang, C. H. Lai, C. C. Chiang, and C. H. Yang, *J. Appl. Phys.* **99**, 08R508 (2006).
- [5] J. P. Noieres, S. Jaren, Y. B. Zhang, A. Zeltser, K. Pentek, and V. S. Speriosu, *J. Appl. Phys.* **87**, 3920 (2000).
- [6] G. W. Anderson, Y. Huai, and M. Pakala, *J. Appl. Phys.* **87**, 5762 (2000).
- [7] M. Saito, N. Hasegawa, F. Koike, H. Seki, and T. Kuriyama, *J. Appl. Phys.* **85**, 4928 (1999).
- [8] M. Takiguchi, S. Ishii, E. Makino, and A. Okabe, *J. Appl. Phys.* **87**, 2469 (2000).
- [9] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 82 (2017).
- [10] P. Khajidmaa and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 193 (2013).
- [11] P. Khajidmaa, K. J. Park, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 98 (2013).
- [12] J. G. Choi and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **21**, 132 (2011).
- [13] P. Khajidmaa, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 7 (2017).
- [14] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [15] S. S. Lee and D. G. Hwang, *New Phys.: Sae Mulli* **37**, 314 (1997).
- [16] J. G. Choi, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **19**, 142 (2009).