

Magneto-resistance of Single-type and Dual-type GMR-SV Multilayer Thin Films with Top and Bottom IrMn Layer

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

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

(Received 26 June 2017, Received in final form 30 July 2017, Accepted 31 July 2017)

The antiferromagnet IrMn based four different GMR-SV multilayers on Corning glass were prepared by using ion beam deposition and DC magnetron sputtering system. The magneto-resistance (MR) properties for single-type and dual-type GMR-SV multilayer films were investigated through the measured major and minor MR curves. The exchange bias coupling field (H_{ex}) and coercivity (H_c) of pinned layer, the H_c and interlayer exchange coupling field (H_{int}) of free layer for the dual-type structure GMR-SV multilayer films consisted of top IrMn layer were 410 Oe, 60 Oe, 1.6 Oe, and 7.0 Oe, respectively. The minor MR curve of two free layers was performed the squarelike feature having a MR ratio of 8.7% as the sum of 3.7% and 5.0%. The value of average magnetic field sensitivity (MS) was maintained at 2.0%/Oe. Also, the magneto-resistance properties of the single-type and dual-type structure GMR-SV multilayer films consisted of bottom IrMn layer were decreased more than those of top IrMn layer. Two antiparallel states of magnetization spin arrays of the pinned and free layers in the dual-type GMR-SV multilayer films occurred the maximum MR value by the effect of spin dependence scattering.

Keywords : antiferromagnet, dual-type GMR-SV multilayer structure, magneto-resistance curve, magnetization spin array

상부와 하부 IrMn층을 갖는 단일구조 및 이중구조 거대자기저항-스핀밸브 다층박막의 자기적 특성 비교 분석

최종구 · 김수희 · 최상헌 · 이상석*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 26339

(2017년 6월 26일 받음, 2017년 7월 30일 최종수정본 받음, 2017년 7월 31일 게재확정)

반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 4가지 다른 유형으로 GMR-SV 다층박막을 Corning glass 위에 이온빔 증착 시스템과 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템으로 제조하였다. 모든 박막시료는 진공 열처리 후 측정된 major 및 minor 자기저항(MR) 곡선으로부터 자기적 특성을 조사하였다. IrMn 박막이 삽입된 상부층의 이중구조(dual-type structure) GMR-SV 다층박막에서 고정층의 교환결합력(H_{ex})과 보자력(H_c), 자유층의 보자력과 상호교환결합력(H_{int})은 각각 410 Oe, 60 Oe, 1.6 Oe, 7.0 Oe이었다. 2개의 자유층에 의한 히스테리시스 곡선은 안정된 사각비를 형성하였으며, 자기저항비(MR(%))는 3.7%와 5.0%의 합으로 8.7%이었다. 그리고 평균 자장민감도(MS)가 2.0%/Oe을 유지하고 있었다. 반면에 IrMn 박막이 삽입된 하부층의 단일구조와 이중구조 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성은 IrMn 박막이 삽입된 상부층의 단일구조와 이중구조 GMR-SV 다층박막보다 훨씬 저하하게 나타났다. 이중구조 GMR-SV 다층박막의 강자성체인 고정층과 자유층의 자화 스핀배열을 서로 반평행 상태에서 독립적인 이중 스핀 의존산란(Spin-dependent Scattering) 효과에 의해 MR은 최대값을 나타내었다.

주제어 : 반강자성체, 이중구조 GMR-SV 다층박막, 자기저항 곡선, 자화 스핀배열

I. 서 론

100 μOe 에서 100 Oe까지의 자기장 영역을 측정할 수 있는 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve, GMR-SV) 박막구조를 갖는 센서를 개발하여 응용하는 연구가 지난 수 십 년부터 현재까지 이루어져 왔다[1, 2]. 자성센서는 미세 자기장을 검출하는 출력신호 크기와 자장민감도(magnetic sensitivity, MS)를 높이는 것이 중요하다. 최근 연구되고 있는 자기저항비(magnetoresistance ratio, MR(%))가 높은 고감도의 이중구조(dual-type structure) GMR-SV 다층박막에서 이중 반강자성체 박막과 자유층의 연자성 박막 두께가 증가할 때 발생하는 누설전류(shunting current)는 자기저항비를 감소시킨다[3-5].

광 리소그래피 공정을 이용하여 제작된 GMR-SV 소자의 자장민감도에 대한 폭 두께의 의존성을 감안하여 볼 때, 반강자성체(antiferromagnet, AFM)와 교환결합력(exchange bias coupling field, H_{ex})이 일어나는 강자성체(ferromagnet, FM)의 고정층(pinned layer)은 소자의 폭 방향을 자화 용이축으로 정하게 된다[6, 7]. 또한 강자성체의 고정층과 비자성체(non-magnetic, NM)인 Cu층을 사이에 두고 전도전자의 평균 자유경로(mean free path) 두께만큼 떨어진 강자성체의 자유층(free layer)은 비록 고정층과 상호교환결합력(interlayer exchange coupling field, H_{int})이 일어나지만 길이 방향으로 형성 자기 이방성을 유도하도록 GMR-SV 소자를 제작하게 된다. 따라서 GMR-SV 다층박막을 적층할 때 형성되는 일축 자기이방성 유도와 소자를 제조하는 패터닝(patterning) 과정에서 일어나는 형성 자기이방성 유도는 자장민감도의 저하와 노이즈(noise)가 발생하게 된다. 이것은 외부 자기장이 없는 영점(zero point)을 기준으로 낮은 자기장 영역에서 비선형 특성을 갖게 되어 바이오소자 활용에 주요한 방해요인이 될 수 있다[6-9].

본 연구는 나노자성을 감지할 수 있는 바이오센서로 사용하기 위해 반강자성체인 IrMn층의 단일구조와 이중구조를 갖는 4가지 다른 유형으로 GMR-SV 다층박막을 제작하였다. GMR-SV 다층박막에 대한 자기적 특성으로 자기저항비, 자장민감도 그리고 고정층과 자유층의 교환결합력, 보자력(coercivity, H_c)의 값을 상온에서 4단자법으로 측정된 자기저항 곡선을 분석하여 각각 정하였다. 자기저항비를 향상시키는 방법으로 기판 위에 형성한 이중구조 GMR-SV 다층박막에서 반강자성체인 IrMn 박막을 기준으로 상부층과 하부층으로 구분하였다. 반강자성체와 교환결합한 강자성체인 고정층과 자유층의 자화 스핀배열에 의존하는 자기적 특성을 각각 비교하여 조사하였다.

II. 실험 방법

반강자성체인 IrMn층과 강자성체인 CoFe층, NiFe층이 포

함된 GMR-SV 다층박막은 Corning glass 위에 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템과 DC 마그네트론 스퍼터링(DC magnetron sputtering) 시스템을 이용하여 제작되었다. 초고진공(ultrahigh vacuum; UHV) 챔버 내에 설치된 이온빔 증착 시스템과 DC 마그네트론 스퍼터링 증착 시스템은 6개의 3-인치 타겟과 3개의 1-인치 타겟이 각각 장착되어 있다. UHV 챔버의 기본 진공도는 1×10^{-7} Torr으로 사용한 이온빔 시스템의 이온 건은 직경 3 cm 탄소판 그리드(grid)를 갖는 카프만 소스(Kaufman source)이었다[8-13].

이온빔 증착과 스퍼터링 증착 시 아르곤 가스 분압은 각각 2.0×10^{-4} Torr과 3.0×10^{-3} Torr이었다. 이온빔 증착율을 결정하는 가속 전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온빔 전압 및 전류값은 각각 120 V, 30 V, 800 V, 6.0 mA이었다. 800 eV의 에너지를 갖는 아르곤-이온(Ar-ion) 빔(beam)이 타겟에 입사되고 Ta, NiFe, CoFe, Cu 박막의 경우에는 타겟의 원자가 이온 빔 스퍼터링으로 형성되어 기판에 증착된다. 각각 Ta, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, $\text{Co}_{81}\text{Fe}_{19}$, Cu의 경우 각각 에칭율(etich rate)은 420 Å/min, 440 Å/min, 400 Å/min, 880 Å/min으로 타겟의 종류에 의존하며, 각각 타겟에 대한 기판에 증착되는 박막의 보정 증착율은 각각 0.2 nm/s, 0.2 nm/s, 0.2 nm/s, 0.35 nm/s이었다. IrMn 박막 증착의 경우에는 타겟의 원자가 원형 마그네트론의 자기장 세기가 큰 쪽으로 접속되어 스퍼터링 되는 전력(electric power) 인가 조건은 340 V와 70 mA이었고, Mn과 Ir의 스퍼터 에칭율(sputter etch rate = sputter yield \times Y-factor)이 각각 87.21(= 0.19 \times 459) atoms/ion과 586.3(= 1.1 \times 533) atoms/ion을 고려하여 합금된 $\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}$ 박막의 증착율은 0.2 nm/s으로 보정하였다.

균일한 350 Oe의 자기장 크기를 갖는 원통형 영구자석이 감싸는 공간에 장착된 샘플 홀더(sample holder)의 중앙에 있는 박막시료는 증착 시 일축이방성이 유도되었다. 챔버 내 샘플 홀더에 근접한 위치에 있는 수정 발진자(quartz crystal oscillator)가 증착 중 박막의 두께를 모니터링 하는 것으로 사용되었다[14].

반강자성체인 IrMn 박막을 상부층으로 삽입한 GMR-SV 다층박막의 Type A형 구조와 IrMn 박막을 하부층으로 삽입한 Type B형 구조를 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 각각 나타내었다. 즉 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 서로 다르게 삽입한 2가지 유형의 다층구조는 각각 Glass/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta와 Glass/Ta/NiFe/IrMn/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta으로 구조를 갖는다. 또한 IrMn 박막을 사이에 삽입한 Type C형 이중구조를 Fig. 1(c)에 나타내었으며 IrMn 박막을 하부층과 최상부층으로 삽입한 Type D형 이중구조를 Fig. 1(d)에 나타내었다. 즉 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 서로 다르게 삽입한 2가지 유형의 이중 GMR-SV 다층구조는 각각 Glass/

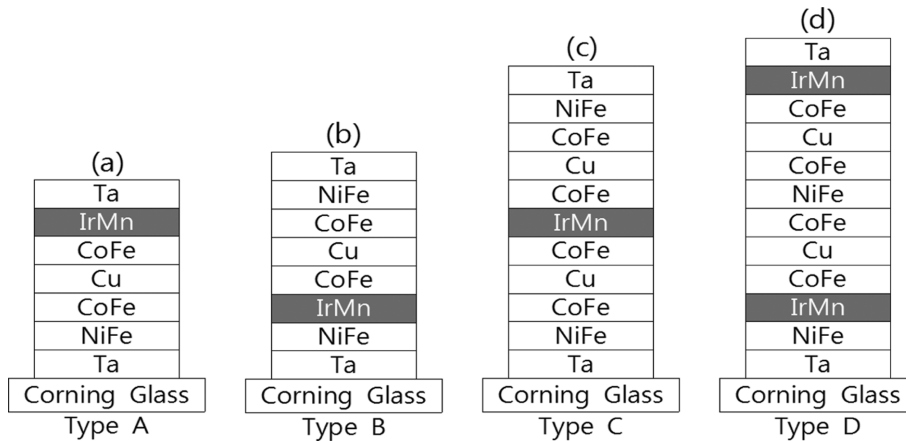


Fig. 1. Four different types of the IrMn based GMR-SV films having single-type (Type A and Type B) and dual-type (Type C and Type D) multilayer structures. Here Type A and Type C are the top IrMn layer based GMR-SV films, Type B and Type D are the bottom IrMn layer based GMR-SV films.

Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta와 Glass/Ta/NiFe/IrMn/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta으로 구조를 갖는다. 모든 박막시료의 자기적 특성을 향상시키기 위하여 열처리 온도는 진공챔버에 장착된 열처리 기구를 통하여 5.0×10^{-6} Torr의 진공상태로 1 kOe의 자기장 하에서 1시간 동안 200 °C을 유지하도록 설정하였다. Fig. 1에서 보여준 4가지 다른 유형으로 제작한 GMR-SV 다층박막을 4-단자법으로 용이축(easy axis)에서 측정하였다. 자화 용이축의 major 및 minor 자기저항 곡선으로부터 IrMn 박막이 삽입된 상부층과 IrMn 박막이 삽입된 하부층으로 교환결합력을 갖는 강자성체의 고정층에 따른 보자력, 강자성체의 고정층과 자유층에 따른 상호교환결합력 그리고 자기저항비를 구하였다.

III. 실험결과 및 토의

반강자성체인 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 다르게 삽입한 단일구조와 이중구조를 갖는 4가지 유형의 GMR-SV 다층박막에서 측정된 major 자기저항 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 전형적인 Ta 버퍼층 위에 자유층으로 사용한 NiFe/CoFe 박막과 고정층으로 사용한 CoFe/IrMn 박막 사이에 비자성체인 Cu층을 삽입한 GMR-SV 다층구조(Type A)는 Glass/Ta(10 nm)/NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7.5 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm)이었다. Fig. 2(a)는 외부 자기장에 따라 Type A에서 측정된 자기저항 곡선을 보이고 있다. Type A는 비교적 안정된 자기적 특성을 보여주고 있으며, 고정층의 교환결합력과 보자력, 자기저항비는 각각 400 Oe, 50 Oe, 5.7%이었다. 반강자성체인 IrMn 박막의 특성을 유도하기 위해 이중 버퍼층으로 삽입한 Ta/NiFe 이중박막 위에 바로 증착된 IrMn 박막이 삽입된 하부층과 비자성체인 Cu층을 사

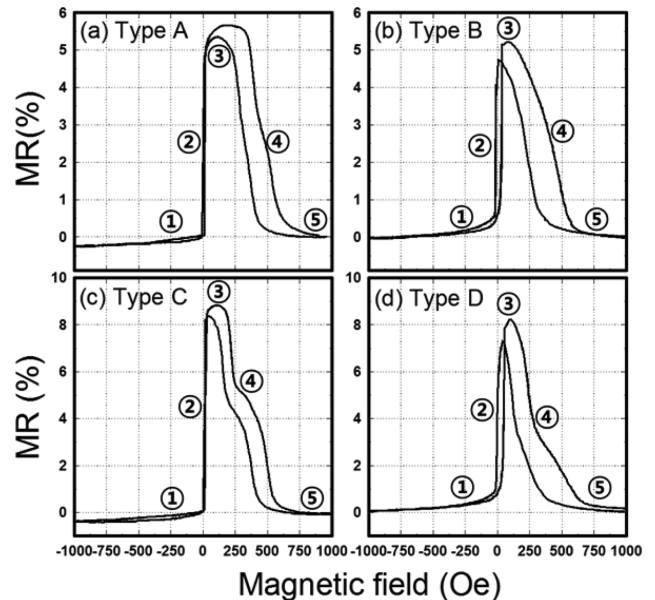


Fig. 2. Major MR Curves for the four types samples having (a) top IrMn single-type GMR-SV, (b) bottom IrMn single-type GMR-SV, (c) top IrMn dual-type GMR-SV, and (d) bottom and top IrMn dual-type GMR-SV. Here, the circle numbers (1, 2, 3, 4, 5) are represented by the different five configuration array steps of FM (ferromagnet) layers according to the applied measuring magnetic field from +1000 Oe to -1000 Oe.

이에 두고 강자성체의 고정층으로 삽입한 CoFe과 강자성체의 자유층으로 삽입한 NiFe/CoFe 이중박막으로 이루어진 GMR-SV 다층박막의 Type B형 구조는 Glass/Ta(10 nm)/NiFe(10 nm)/IrMn(10 nm)/CoFe(7.5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(5 nm)/NiFe(15 nm)/Ta(5 nm)으로써 이에 대한 자기저항 곡선을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 외부 자기장에 따라 측정된 자기저항 곡선은 IrMn 박막을 상부층으로 한 GMR-SV 다층박막의

Type A형 구조와 비교하여 사각비 모양이 없어진 자기적 특성을 Fig. 2(b)에서 보여주고 있다. 고정층의 교환결합력과 보자력, 자기저항비는 각각 310 Oe, 100 Oe, 5.3 %이었다.

Ta 박막의 버퍼층을 위에 비자성체인 Cu층을 사이에 두고 강자성체의 자유층으로 삽입한 NiFe/CoFe 이중박막과 강자성체의 고정층으로 적층한 CoFe 박막 그리고 반강자성체의 상부층으로 적층하였다. 삽입한 IrMn 박막 위에 또 하나의 비자성체인 Cu층을 사이에 두고 강자성체의 고정층으로 CoFe 박막과 강자성체의 자유층으로 적층한 NiFe/CoFe 이중박막으로 이루어져 있다. 이중 GMR-SV 다층박막의 Type C형 구조는 Glass/Ta(10 nm)/NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7.5 nm)/IrMn(10 nm)/CoFe(7.5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(5 nm)/NiFe(15 nm)/Ta(5 nm)이다. 이에 대한 자기저항 곡선을 Fig. 2(c)에 나타내었다. 외부 자기장에 따라 측정된 자기저항비는 8.7%으로 향상되어 비교적 안정된 2단계 형태의 자기저항 곡선으로 자기적 특성을 Fig. 2(c)에서 보여주고 있다. Type C형의 이중구조 GMR-SV 다층박막으로 중간에 위치한

IrMn 박막이 삽입된 하부 고정층에서 제1의 교환결합력(H_{ex1})과 제1의 보자력(H_{c1})은 각각 410 Oe, 60 Oe이었다. 또한 IrMn 박막이 삽입된 상부 고정층에서 제2의 교환결합력(H_{ex2})과 제2의 보자력(H_{c2})은 각각 170 Oe, 50 Oe이었다. Ta 박막의 버퍼층과 강자성체인 NiFe층 위에 최하부층과 최상부층으로 2개의 반강자성체인 IrMn 박막과 강자성체의 고정층으로 적층한 CoFe 박막과 2개의 비자성체인 Cu층을 사이에 두고 하나의 공통된 강자성체의 자유층으로 삽입한 NiFe/CoFe/NiFe 삼중박막으로 이루어져 있다. 하부형 이중 GMR-SV 다층박막의 Type D형 구조는 Glass/Ta(10 nm)/NiFe(10 nm)/IrMn(10 nm)/CoFe(7.5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(5 nm)/NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm)/IrMn(10 nm)/CoFe(7.5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(5 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm)이다. 이에 대한 자기저항 곡선을 Fig. 2(d)에 나타내었다. 외부 자기장에 따라 측정된 자기저항비는 8.2%으로 향상되었지만 비교적 Type C형보다는 기울어진 히스테리시스 곡선으로 2단계 형태의 자기적 특성을 Fig. 2(d)에서 보여주고 있다. Type D형 이중구조 GMR-SV

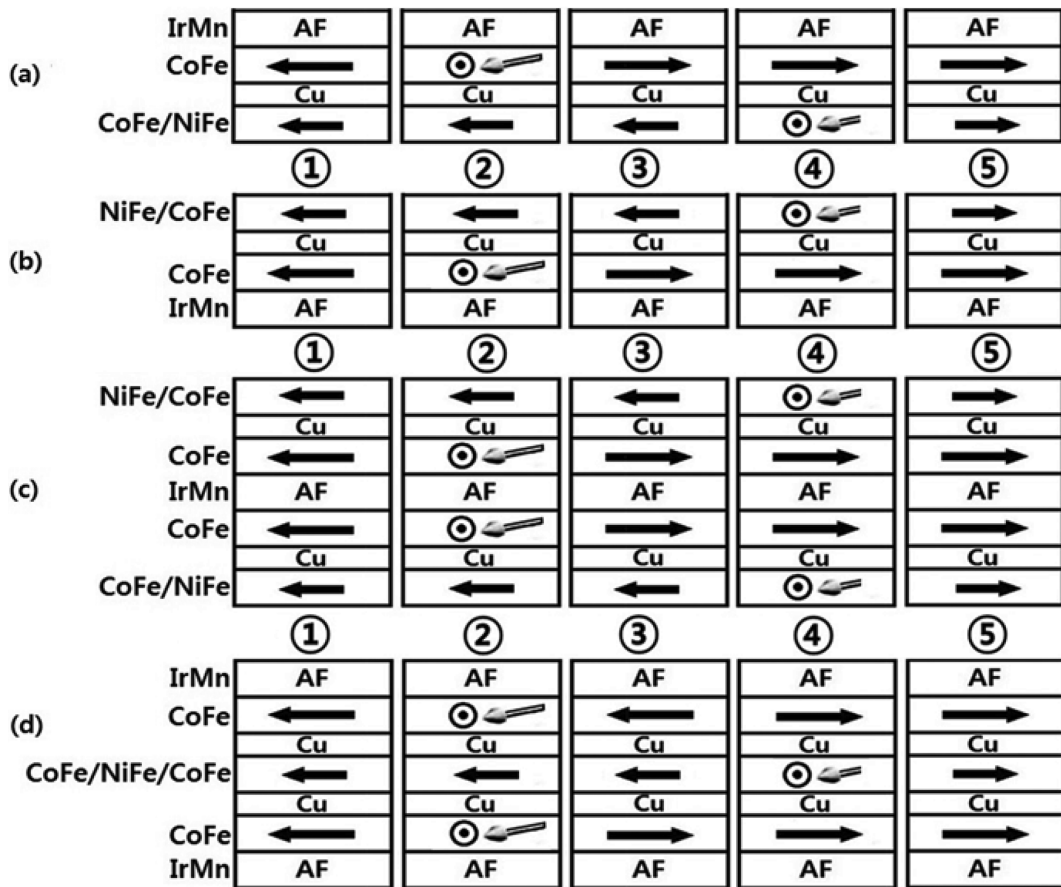


Fig. 3. The configuration spin arrays of typical magnetic domain the schematic of spin structure at five different points marked to four different major MR curves with (a) FM/Cu/FM/AF, (b) AF/FM/Cu/FM, (c) FM/Cu/FM/AF/FM/Cu/FM, and (d) AF/FM/Cu/FM/Cu/FM/AF as shown in Fig. 2. The creation of a partial AF domain of IrMn layer wall and the spins close to the FM/AF/FM interface can see in the center of a dual-type GMR-SV multilayers. Here FM and AF are ferromagnet layer and antiferromagnet layer, respectively.

다층박막으로 하부에 위치한 IrMn 박막이 적층된 고정층에서 제1의 교환결합력(H_{ex1})과 제1의 보자력(H_{c1})은 각각 370 Oe, 120 Oe이었다. 또한 IrMn 박막이 삽입된 고정층에서 제2의 교환결합력(H_{ex2})과 제2의 보자력(H_{c2})은 각각 135 Oe, 65 Oe 이었다.

Fig. 2(a), 2(b), 2(c) 그리고 2(d)에서 외부 자기장에 따라 측정된 major 자기저항 곡선을 따라 표시한 괄호안의 번호 ①, ②, ③, ④, ⑤는 자기저항 측정 시 외부 자기장에 따라 영역 범위를 +1000 Oe에서 -1000 Oe까지 반강자성층과 강자성층의 자화 스핀 방향에 따라 다른 5가지 스핀배열을 나타낸 것이다[8, 15, 16].

Fig. 3은 Fig. 1에서 보여준 반강자성체인 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 서로 다르게 적층한 단일구조 GMR-SV 다층박막과 이중구조 GMR-SV 다층박막의 4가지 유형에 대한 모든 자성층의 자화 스핀배열을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 표시한 괄호안의 번호와 동일한 번호는 외부 자기장 하에서 자화 스핀배열의 변화가 일어나면서 자기저항비의 차이를 알 수 있는 5단계를 대응시킨 것이다. 반강자성체와 인접한 강자성체의 자화는 고정층일 때 긴 회살표로 크기를 표시하였고 자유층일 때 짧은 회살표로 크기를 표시하였다. Fig. 3의 ①과 ⑤에서는 큰 값을 가지는 외부 자기장에 동일한 방향으로 모든 자성층의 자화 스핀배열이 평행을 이루고 있으므로 Fig. 2의 자기저항 곡선에서 보여준 자기저항비가 최소 값을 갖게 된다. Fig. 3의 ②과 ④에서는 외부 자기장이 감소하므로 먼저 자유층의 자화 스핀배열은 면방향 90°를 회전하여 나중에 고정층의 자화 스핀배열이 90°를 회전하게 되는 현상을 나타내었다. 이 때 자기저항 곡선에서 가장 선형적으로 외부 자기장에 따라 민감하게 변하는 중앙부분에 위치하게 된다[8, 15].

Fig. 4는 Fig. 1에서 보여준 4가지 다른 유형으로 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성을 외부 자기장에 따라 영역 범위를 +60 Oe에서 -60 Oe까지 측정된 minor 자기저항 곡선이다. Fig. 4(a)에서 보여준 Type A의 minor 자기저항 곡선에서 비자성체인 Cu층을 사이에 두고 Ta 박막의 버퍼층 위에 위치한 강자성체의 자유층으로 NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm) 이중박막을 적층하였다. IrMn 박막이 삽입된 상부층과 인접한 강자성체의 고정층으로 적층한 CoFe(7.5 nm) 박막 간 상호교환결합력과 자유층의 보자력은 각각 6.0 Oe, 3.0 Oe이었다. 자유층에서의 히스테리시스 곡선은 안정된 사각비를 형성하여 자기저항비는 5.7%이고 평균 자장민감도는 2.0%/Oe를 유지하였다.

Fig. 4(b)에서 보여준 Type B의 minor 자기저항 곡선에서 최상부층에 위치한 강자성체의 자유층으로 적층한 NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm) 이중박막과 IrMn 박막이 삽입된 하부층과

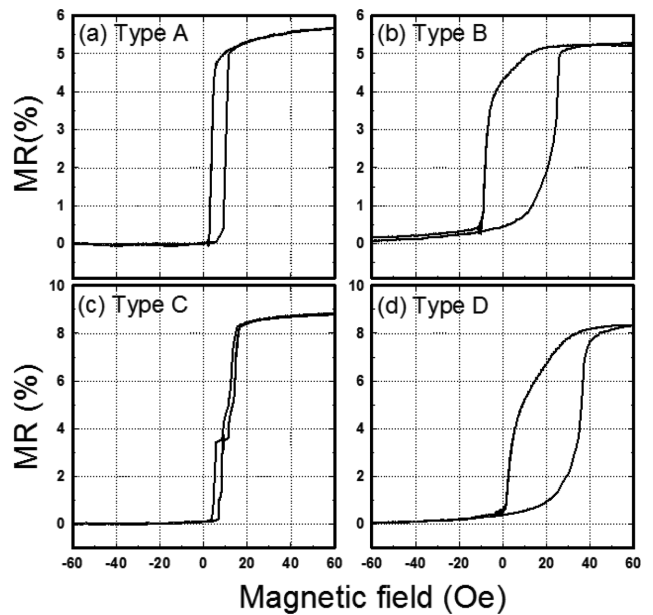


Fig. 4. Minor MR Curves for the four types samples with (a) Type A : IrMn top single GMR-SV multilayers, (b) Type B : IrMn bottom single GMR-SV multilayers, (c) Type C : IrMn top dual GMR-SV multilayers, and (d) Type D : IrMn bottom dual GMR-SV multilayers.

인접한 강자성체의 고정층으로 삽입한 CoFe(7.5 nm) 박막 간 상호교환결합력과 자유층의 보자력은 각각 8.0 Oe, 16 Oe이었다. 자유층에서의 히스테리시스 곡선은 불안정된 사각비를 형성하여 자기저항비는 5.3%이고 평균 자장민감도는 0.15%/Oe으로 저하된 값을 유지하고 있었다.

Fig. 4(c)에서 보여준 이중 GMR-SV 구조를 갖는 Type C의 minor 자기저항 곡선에서 IrMn 박막이 적층된 상부층을 중간에 위치하였다. 이와 인접한 2개의 고정층으로 적층한 CoFe(7.5 nm) 박막을 상부와 하부로 비자성체인 Cu층을 사이에 두고 Ta 박막의 버퍼층 위에 위치한 강자성체의 자유층으로 NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm) 이중박막을 적층하였다. 최상부에 위치한 강자성체의 자유층으로 적층한 NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm) 이중박막 간 공통된 자유층이 아닌 서로 독립적인 2개의 자유층을 가지고 있으므로 발생하는 상호교환결합력과 자유층의 보자력은 각각 따로 존재하게 되는 것을 보여주었다. 반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 하부층에서 일어나는 제1의 상호교환결합력(H_{in1})과 제1의 보자력(H_{c1})은 각각 7.0 Oe와 1.6 Oe이었다. 또한 반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 상부층에서 일어나는 제2의 상호교환결합력(H_{in2})과 제2의 보자력(H_{c2})은 각각 14.0 Oe와 1.0 Oe이었다. 2개의 자유층으로 히스테리시스 곡선은 안정된 사각비를 형성하여 자기저항비는 3.7%와 5.0%의 합으로 8.7%이었다. 그리고 평균 자장민감도는 2.0%/Oe를 유지하고 있었다.

Fig. 4(d)에서 보여준 Type D의 minor 자기저항 곡선에서

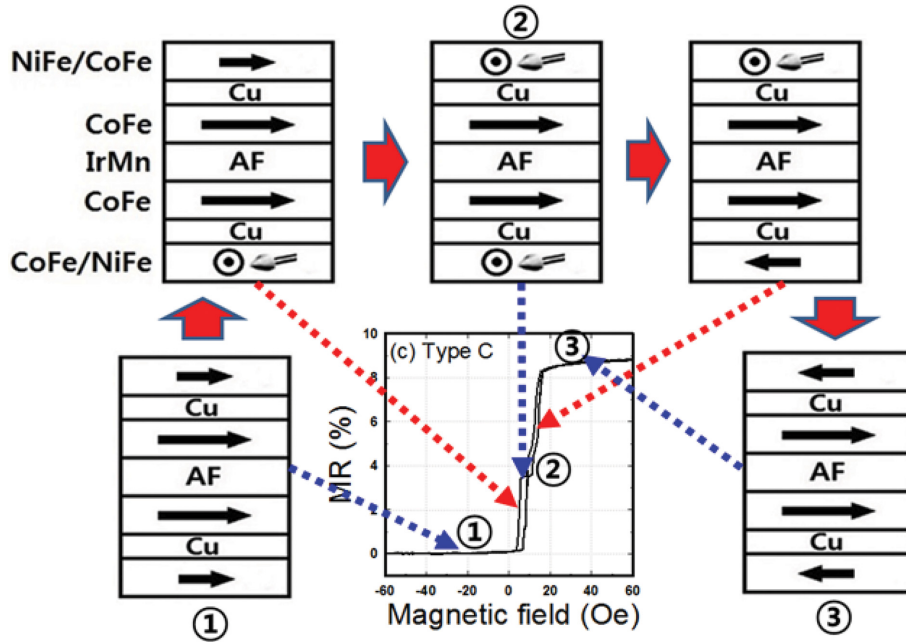


Fig. 5. (Color online) The schematic of detailed process for the changing stages of configuration spin arrays of typical magnetic domains from ① point to ② and from ② to ③ point on the Type C : IrMn top dual-type GMR-SV multilayers. The two different hysteresis minor MR curves were caused by the occurrence of independent ferromagnet free NiFe/CoFe bilayers posited on the separated states from each other.

중간에 위치한 1개의 자유층으로 삽입한 CoFe(5 nm)/NiFe(15 nm)/CoFe(5 nm) 삼중박막 사이에 일어나는 IrMn 박막이 삽입된 최하부층과 최상부층으로 인접한 고정층으로 삽입한 2개의 CoFe(7.5 nm) 간 상호교환결합력과 자유층의 보자력은 각각 20 Oe, 17 Oe이었다. 자유층으로 히스테리시스 곡선은 Type B와 마찬가지로 불안정된 사각비를 형성하여 자기저항비는 8.2%이고 평균 자장민감도는 Fig. 4(c)에 나타난 Type B와 같이 0.12%/Oe으로 저하된 값을 유지하고 있었다.

Fig. 5는 Type C의 minor 자기저항 곡선에서 IrMn 박막이 적층된 상부층을 중간에 위치하여 상부와 하부로 2개의 고정층과 2개의 자유층 사이로 이루어진 이중구조 GMR-SV 다층박막에서 Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에서 보여준 바와 같이 ①단계 → ②단계 → ③단계로 변화할 때의 자세한 자화 스핀 배열을 나타낸 것이다. Fig. 5의 minor 자기저항 곡선에서

살펴본 바와 같이 자화 스핀배열이 선형적인 자기저항 곡선에서 외부의 작은 자기장이 증가함에 따라 자유층의 스핀이 면상으로 90° 회전하여 발생하는 단계로 설명이 가능하였다 [8, 15, 16]. Fig. 5에서 표시된 적색과 청색의 화살표는 다층구조의 자화 스핀배열에 해당하는 단계를 나타낸 것이다. ①단계일 때 이중 GMR-SV 다층구조 내 강자성체의 자화 스핀배열이 왼쪽으로 모두 평행이므로 스핀 의존산란 효과에 의한 자기저항이 최소값이 되었다. ②단계일 때 이중 GMR-SV 다층구조 내 강자성체의 고정층과 자유층으로 자화 스핀 배열을 오른쪽으로 서로 반평행 상태에서 2개가 되도록 독립적인 이중 스핀 의존산란 효과에 의한 자기저항값이 최대로 나타났다.

Table I은 반강자성체인 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 서로 다르게 삽입한 단일구조와 이중구조 GMR-SV 다층박

Table I. Magnetic properties (H_{ex} (Oe), H_c (Oe), H_{int} (Oe), MR (%)) of top and bottom IrMn layers based two single-type GMR-SV multilayers and two dual-type GMR-SV multilayers. Here 1st and 2nd are magnetoresistance properties for two minor MR curves caused by the occurrence of independent ferromagnet free NiFe/CoFe bilayers posited on the separated states from each other.

Sample	Annealing temp.	Pinned H_{ex} (Oe)		Pinned H_c (Oe)		Free H_c (Oe)		Free H_{int} (Oe)		Free MR (%)		Tot. MR (%)	Ave. MS (%/Oe)
		1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd		
Type A (Single GMR-SV)	200 °C	400	-	50	-	3.0	-	6.0	-	5.7	-	5.7	2.0
Type B (Single GMR-SV)	200 °C	310	-	100	-	16	-	8.0	-	5.3	-	5.3	0.15
Type C (Dual GMR-SV)	200 °C	410	170	60	50	1.6	1.0	7.0	14	3.7	5.0	8.7	2.0
Type D (Dual GMR-SV)	200 °C	370	135	120	65	17	-	20	-	8.2	-	8.2	0.12

막의 4가지 유형에 대한 major 및 minor 자기저항 곡선에서 자기적 특성을 요약한 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 상부층과 하부층에 각각 위치하였을 때 일어나는 자화 스핀배열에 따른 자기적 특성을 관찰하였다. IrMn 박막이 삽입된 하부층에 있을 때 계면과 이웃한 고정층의 큰 교환결합력으로 이중구조를 갖는 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성이 Ta 박막의 비정질 결정 구조적 특성에 따라 불안정하게 약화된 자기적 특성이 나타났다. 한편 자기적 특성을 향상시키는 IrMn 박막을 상부층으로 삽입한 이중구조 GMR-SV 다층박막에서 고정층과 분리된 2개의 자유층으로 자화 스핀배열의 방향 전환이 2단계로 스핀의 스위칭 효과(switching effect)를 갖게 되었다. 2개의 서로 다른 minor 자기저항 곡선을 유지하여 Table I과 같이 교환결합력과 보자력, 상호교환결합력, 자기저항비를 나타내었다.

IV. 결 론

반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 4가지 다른 유형으로 GMR-SV 다층박막을 Corning glass 위에 이온빔 증착 시스템과 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템으로 제조하여 진공 열처리 후 박막시료의 자기적 특성을 조사하였다. 2개의 단일 구조 GMR-SV 다층박막과 2개의 이중구조 GMR-SV 다층박막을 측정하여 얻은 major 및 minor 자기저항 곡선에서 고정층의 교환결합력과 보자력, 자유층의 상호교환결합력과 보자력, 자기저항비를 각각 강자성층의 자화 스핀배열에 따른 자기적 특성을 비교 분석하였다.

IrMn 박막을 상부층으로 삽입한 단일구조 GMR-SV 다층박막에 대한 고정층에서의 교환결합력과 보자력, 자유층에서의 보자력과 상호교환결합력 그리고 자기저항비와 자장민감도는 각각 400 Oe, 50 Oe, 3.0 Oe, 6.0 Oe, 5.7 %, 2.0 %/Oe이었다. 또한 IrMn 박막을 상부층으로 삽입한 이중구조 GMR-SV 다층박막에 대한 고정층에서의 교환결합력과 보자력, 자유층에서의 보자력과 상호교환결합력은 각각 410 Oe, 60 Oe, 1.6 Oe, 7.0 Oe이었다. 특히 반강자성체인 IrMn 박막이 삽입된 상부층에서 일어나는 제2의 상호교환결합력과 제2의 보자력은 각각 14.0 Oe와 1.0 Oe이었다. 2개의 자유층으로 히스테리시스 곡선은 안정된 사각비를 형성하여 자기저항비는 3.7%와 5.0%의 합으로 8.7%이었다. 그리고 평균 자장민감도는 2.0%/Oe를 유지하고 있었다. 반면에 IrMn 박막을 하부층으로 삽입한 단일구조와 이중구조 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성은 IrMn 박막을 상부층으로 삽입한 단일구조와 이중구조 GMR-SV 다층박막보다 크게 저하되었다.

반강자성체인 IrMn 박막을 상부층과 하부층으로 서로 다르

게 삽입한 단일구조 GMR-SV 다층박막과 이중구조 GMR-SV 다층박막의 4가지 유형에 대한 모든 자성층의 자화 스핀배열에 따른 자기적 특성을 비교 분석하였다. 외부 자기장이 클 때 같은 방향으로 모든 자성층의 자화 스핀배열이 평행을 이루고 있으므로 자기저항비가 최소값을 갖게 되었다. 그리고 외부 자기장의 감소에 따라 먼저 자유층의 자화 스핀배열은 면방향 90°을 회전하여 고정층의 자화 스핀배열이 면방향 90°으로 다시 회전하는 현상을 나타내었으며, 자기저항 곡선에서 가장 선형적으로 외부 자기장에 따라 민감히 변화하는 중앙으로 위치를 나타내었다. 강자성체 고정층과 자유층의 자화 스핀배열이 서로 반평행 상태로 되어 독립적인 이중 스핀의 존산란 효과에 의해 이중구조 GMR-SV 다층박막의 자기저항비가 최대값으로 나타났다.

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. Jang, T. Kang, M. J. Kim, H. J. Kim, and K. Y. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **10**, 196 (2000).
- [5] J. R. Childress, M. J. Carey, S. I. Kiselev, J. A. Katine, S. Maat, and N. Smith, *J. Appl. Phys.* **99**, 08S305 (2006).
- [6] P. Khajidmaa and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 193 (2013).
- [7] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [8] H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper, *J. Vac. Sci. Tech.* **21**, 725 (1982).
- [9] P. Khajidmaa, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 7 (2017).
- [10] J. G. Choi, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *Thin Solid Films* **519**, 8394 (2011).
- [11] J. G. Choi, D. G. Hwang, S. S. Lee, and J. R. Rhee, *J. Kor. Phys. Soc.* **62**, 1954 (2013).
- [12] B. K. Kim, J. Y. Lee, S. S. Kim, D. G. Hwang, S. S. Lee, J. Y. Hwang, M. Y. Kim, and J. R. Rhee, *J. Korean Magn. Soc.* **13**, 187 (2003).
- [13] S. S. Lee, B. Y. Kim, J. Y. Lee, D. G. Hwang, S. W. Kim, M. Y.

Kim, J. Y. Hwang, and J. R. Rhee, *J. Appl. Phys.* **95**, 7525 (2004).

[14] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 82 (2017).

[15] M. Fecioru-Morariu, Exchange bias in metallic ferromagnetic and antiferromagnetic bilayers. Effects of structure, dilution, anisotropy and temperature, Ph.D. thesis: Institute of Physics of RTWH Aachen (2008).

[16] J. V. Kim and R. L. Stamps, *Phys. Rev. B* **71**, 094405 (2005).