

Isotropic Magnetoresistance Properties at Low Temperature of Dual and Double Complex Type CoFe/Cu/CoFe Multilayers Based on Antiferromagnetic PtMn Layer

Jong-Gu Choi and Sang-Suk Lee*

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

(Received 22 April 2018, Received in final form 20 June 2018, Accepted 21 June 2018)

The isotropic magnetoresistive (MR) properties of samples fabricated with the dual- and the double-type composite structure of PtMn spin valve (SV) multilayer thin films were measured at room temperature and liquid nitrogen temperature. The MR curves of the dual-type GMR-SV multilayer of 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(10 nm) with a single PtMn layer in the middle are shown as a butterfly wing shape due to the antiferromagnetic PtMn layer effect. The two hysteresis square loops having an isotropic magnetic property are clearly distinguished as the coercive force (H_c) and the MR (%) obtained from MR curve which are 380 Oe, 25 Oe, and 4.3 %, 3.3 %, respectively. The MR curves of the double-type GMR-SV multilayer of Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm) with two PtMn layers show that the H_c and MR (%) obtained from the overlapped hysteresis square of MH loop and MR curve were 375 Oe and 6.4 %, respectively. These results are explained by an effect of the spin arrangement of the magnetization of each ferromagnetic layer in the dual-type GMR-SV film of one PtMn layer and double-type of two PtMn layers. H_c and MR (%) of two types of composite structures measured at 77 K were 1.2~1.5 times higher than those at room temperature due to the increase of spin dependent scattering effect of the electrons in ferromagnetic metal.

Keywords : coercivity, liquid nitrogen temperature, MR curve, Double-type PtMn GMR-SV multilayer structure

반강자성체 PtMn층 기반 이중 및 이중 복합구조 CoFe/Cu/CoFe 다층박막의 낮은 온도에서 등방성 자기저항 특성 연구

최종구 · 이상석*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 우산동 상지대길 83, 26339

(2018년 4월 22일 받음, 2018년 6월 20일 최종수정본 받음, 2018년 6월 21일 게재확정)

2가지 형태의 이중 및 이중구조를 갖는 PtMn계 스핀밸브(Spin Valve, SV) 다층박막을 제작하여 상온과 액체질소 온도(77 K)에서 각각 측정된 자기저항 곡선으로부터 등방성을 나타내는 자기저항 특성을 조사하였다. 단일 PtMn층이 중간에 위치한 이중구조를 갖는 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(10 nm) 스핀밸브 다층박막은 반강자성체 PtMn층의 효과로 인하여 보자력이 다른 나비 날개 형태를 나타내며 MR 곡선을 보여주었다. 자화 곤란축을 따라 측정된 MR 곡선과 MH loop에서 얻은 보자력(H_c)과 자기저항비(MR(%))는 각각 380 Oe, 25 Oe와 4.3 %, 3.3 %으로 두 개의 히스테리시스 사각비가 뚜렷하게 분리되는 등방성 자기적 특성을 나타내었다. 2개의 PtMn층으로 이루어진 이중구조를 갖는 Glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm) 스핀밸브 다층박막은 자화 곤란축을 따라 측정된 MR 곡선과 MH loop으로부터 얻은 H_c 는 375 Oe이고, MR 비는 각각 6.4 %으로 두 개의 히스테리시스 사각비가 겹쳐진 등방성 자기적 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 PtMn층이 1개층 이중구조와 2개층 이중구조를 갖는 GMR-SV 다층박막에서 강자성체의 자화 스핀배열로 일어나는 효과임을 설명하였다. 2가지 형태의 복합구조를 갖는 PtMn계 스핀밸브 다층박막으로 액체질소 온도(77 K)에서 측정된 보자력과 자기저항비는 자성금속체인 강자성체 내 전자들의 스핀의존산란 효과의 증가로 인하여 상온에서 보다 1.2~1.5배 향상된 특성을 나타내었다.

주제어 : 보자력, 액체질소 온도, MR 곡선, 이중 PtMn계 GMR-SV 다층박막 구조

I. 서 론

거대자기저항(giant magnetoresistance; GMR) 효과는 이방성자기저항(anisotropic magnetoresistance; AMR) 또는 홀(Hall) 센서의 감도를 초과하는 외부 자기장의 함수로서 저항이나 전압의 변화를 나타낸다. GMR-스핀밸브(spin valve; SV) 다층구조는 단일 소자(device), 브릿지(bridge), 어레이(array) 등 다른 배열을 갖게 최적화로 설계되는 두 강자성층 사이 비자성층을 포함한다[1-3]. 이제까지 GMR-SV 센서는 나침반, 자동차 애플리케이션, 각도 측정, 인코딩, 금속체와 무기 검출, 전류 측정, 와전류 측정을 통한 비파괴 검사 등에 성공적으로 적용되어 왔다. 또한, GMR 센싱 기술은 미세한 자기장에서 민감하게 반응하는 특성을 이용하여 자기정보저장소자 이외에도 자기구슬(magnetic bead; MB)로 마이크로라벨링을 통해 바이러스나 세포의 생체 신호를 측정하는 바이오 기술 응용 분야와 유체 제어 분야 등에 그 적용 범위가 확대되어 왔다[4,5].

PtMn계 GMR-SV형 다층박막구조는 강자성체와 교환바이어스 결합으로 고정층의 역할을 하는 반강자성체로 IrMn계와 마찬가지로 우수한 내식성과 높은 교환 이방성을 나타내는 특성을 가지고 있다. PtMn 박막이 정렬된(ordered) 면심정방(face centered tetragonal; fct) 격자구조를 띤 PtMn(111) 방향 결정성장으로 천이함으로써 PtMn계 스핀밸브 다층박막 면상으로 일방향(unidirectional) 교환 이방성을 나타내게 되는 조건은 균일한 자기장 하에서 후 열처리과정이다[6-8]. 현재까지 연구되어 온 전형적인 PtMn계 스핀밸브의 적층구조는 Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta의 다층박막 구조이다. 하지만 본 연구팀에서 발표한 연구결과에 의하면, 바닥층 Ta/NiFe/CoFe 대신에 Ta/CoFe로 이루어진 Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta의 다층박막 구조는 상온이나 열처리 후에도 면상 일축 교환 이방성과 달리 보자력이 큰 등방성 자기저항 특성을 가지고

있었다[9]. 이것으로 GMR-SV 다층박막의 등방성 자기저항 특성을 띠는 현상은 반강자성체 PtMn의 fct 격자 구조의 결정방향인 (111)의 성장이 우세하지 못함에 기인된다는 설명이 가능하다. 즉, 스퍼터링법으로 증착되는 PtMn 박막의 다결정 축이 바닥 하부층에 NiFe(111)층의 부재로 인해 CoFe(110)층이 우세하여 PtMn(111) 방향이 아닌 PtMn(110) 결정 방향으로 성장하여 교환결합력을 상쇄하여 자기 이방성보다 자기 등방성에 특성을 갖게 된다고 볼 수 있다[10,11].

본 연구에서는 PtMn계 GMR-SV 다층박막을 이중 및 이중 복합구조로 제작된 시료를 자화 곤란축과 자화 용이축에 따라 4단자 법으로 상온과 액체질소 온도에서 각각 측정된 자기저항(magnetoresistance; MR) 곡선으로부터 등방성 자기저항 특성을 서로 비교하였다. 또한, MR 곡선과 대응시킨 자기이력곡선(MH loop)을 분석하여 강자성체 층간의 자화배열에 따른 자기저항 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

제작된 2가지 형태의 다층박막구조를 갖는 시료는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 단일 PtMn층을 중간에 두고 동일한 두께의 고정 CoFe층으로 하여 이중구조(dual-type)를 갖는 Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/CoFe/Cu/CoFe/Ta(top) 스핀밸브 다층박막과 두개의 PtMn층을 상부층에 두고 동일한 구조가 겹치는 이중형태(double-type)의 구조를 갖는 Ta(bottom)/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta(top) 스핀밸브 다층박막이다. 코닝 유리(Corning 7059) 기판 위에 적층된 다층박막 시료는 챔버의 진공도가 2.5×10^{-6} Torr인 DC 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 증착 시스템을 이용하여 상온에서 각각 제작하였다[12,13]. GMR-SV 다층박막 시료를 상온에서 제작할 때 인가되는 균일한 자기장의 크기는 영구자석을 이용하여 350 Oe를 유지하였다. 직경 3인치

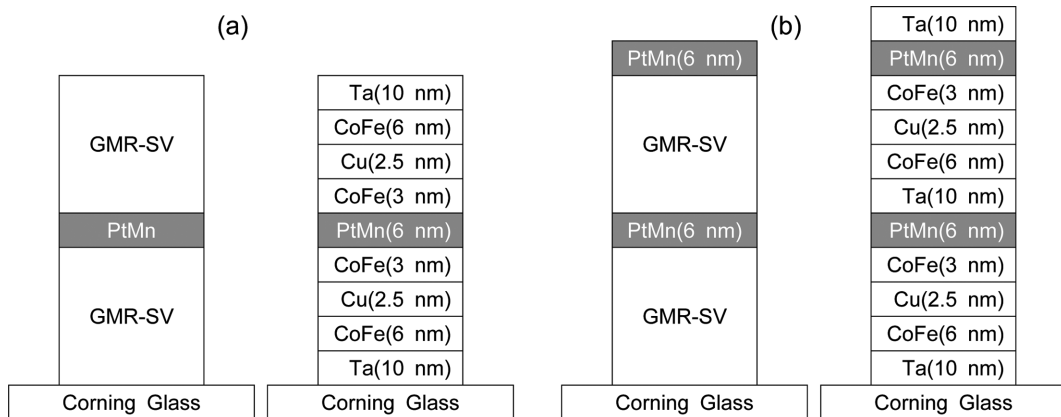


Fig. 1. Schematic structures of (a) the dual-type PtMn-SV multilayer and (b) the double-type PtMn-SV Multilayer.

크기의 Ta, CoFe, Cu와 2인치 크기의 PtMn으로 4개의 각 타겟에서 DC 마그네트론 스퍼터링 증착 시 형성되는 플라즈마의 상호 간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 막기 위해 스테인레스 판 분리막이 사용되었다[14,15]. 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/s이었다. 모든 다층박막 구조를 이루는 바닥층 Ta, 자유층 CoFe, 고정층 CoFe, 반강자성층 PtMn, 보호층 Ta의 두께를 각각 10 nm, 6 nm, 3 nm, 6 nm, 10 nm으로 고정하였다. GMR 특성을 위하여 반강자성체 PtMn 박막과 교환결합한 고정층 강자성체 CoFe 박막과 자유층 강자성체 CoFe 박막 사이에 2.5 nm의 Cu 박막을 적층하였다.

두께 0.1 mm인 구리판 금속 그림자 마스크(shadow mask)를 이용하여 시료 홀더의 양끝에 장착된 영구자석이 만든 350 Oe의 균일한 자기장 하에서 증착한 다층박막 시료를 4단자 법으로 자기저항을 측정하기 위한 폭(width)과 길이(length)를 각각 0.5 mm과 5 mm의 크기가 되게 하였다[9, 16,17]. 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 교환결합세기(exchange coupling field, H_{ex}), 보자력(coercivity, H_c), 자기저항비(magnetoresistance ration, MR(%))를 각각 얻었다[9,16,17]. 또한 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선을 용이축 방향에서 측정된 MR 곡선과 비교 분석하여 자기 등방성 특성을 조사하였다.

III. 실험결과 및 토의

코닝 유리Glass(7059) 위에 증착된 2가지 중 하나인 이중형태 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(10 nm) 스핀밸브 다층박막과 이중형태 Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm) 스핀밸브 다층박막 시료에 대한 상온에서 액체질소 온도(77 K)까지 온도가 하강할 때 4단자 법으로 측정된 저항-온도(resistance-temperature, R-T) 곡선들을 Fig. 2(a)와 2(b)에 각각 나타내었다. Fig. 2(a)에서 이중구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV 시료의 4단자로 측정된 상온에서 저항값은 34.89 Ω 이었으며, 77 K에서 측정된 저항값은 상온의 16.7%인 5.75 Ω 이 감소한 29.14 Ω 이었다. 즉, 온도에

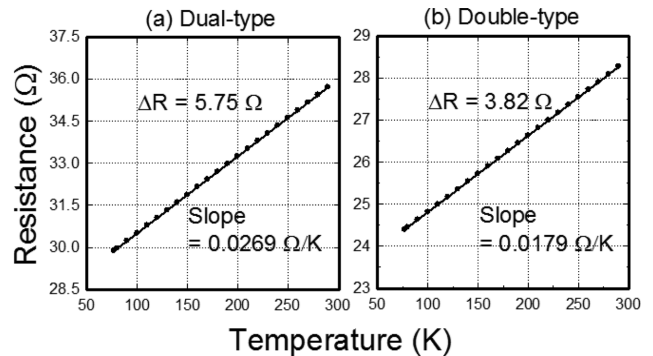


Fig. 2. R-T (resistance-temperature) curves for (a) the dual-type PtMn-SV film of Corning glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/CoFe(3 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(6 nm)/Ta(10 nm) multilyer and (b) the double-type PtMn-SV film of Corning glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(10 nm) multilyer.

따른 저항은 0.0269 Ω/K 기울기로 하강하는 전형적인 금속 다층박막의 특성을 보여주었다. Fig. 2(b)에서는 이중구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV 시료의 4단자로 측정된 상온에서 저항값은 28.55 Ω 이었으며, 77 K에서 측정된 저항값은 상온의 13.4%인 3.82 Ω 이 감소한 24.73 Ω 이었다. 이중구조를 갖는 다층박막의 경우, 온도에 대한 저항값의 기울기는 0.0179 Ω/K 로 이중구조를 갖는 이중구조 형태의 PtMn계 GMR-SV 박막시료보다 0.67배로 낮은 다층박막의 특성을 보여주었다. 이러한 결과는 금속층 PtMn(6 nm)/Ta(10 nm) 박막이 한층 더 많아졌기 때문이라고 볼 수 있다.

2가지 유형의 다층박막 시료들을 자화 용이축 방향으로 상온과 액체질소 온도에서 4단자법으로 측정된 자기저항(MR) 곡선들을 Fig. 3와 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 이중구조를 갖는 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(10 nm) 스핀밸브 다층박막에 대하여 자화 용이축과 자화 곤란축으로 각각 상온에서 측정된 MR 곡선들이다. 상온에서 자화 용이축 방향으로 측정된 Fig. 3(a)에서 이중구조를 갖는 GMR-SV 다층박막의 중간층으로 삽입된 반강자성체 PtMn 박막에서의 효과로 인하여 자화 용이축으로 측정하여 얻은 이중 나비 날개 형태의 자기저항곡선을 보여주고 있다[9]. 이중구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV 다층박막의 교환결합세기(H_{ex})는 나타나지 않았으며, 중간층 PtMn 하부층의 보자력(H_{c1})은 380 Oe, 상부층의 보자력(H_{c2})은 45 Oe, 하부층의 자기저항비 MR_1 는 6.0%와 하부층의 자기저항비 MR_2 는 6.3%의 각각 2가지로 서로 비슷한 값을 유지하였다. 자화 곤란축 방향으로 측정된 Fig. 3(b)에서 얻은 H_{ex} , H_{c1} , H_{c2} 는 Fig. 3(a)와 같은 값을 나타내었고, MR_1 와 MR_2 는 각각

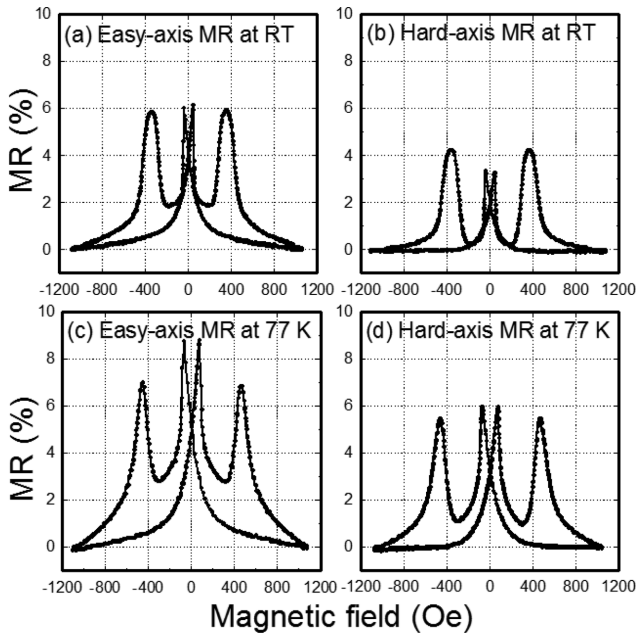


Fig. 3. Major MR curves according to the easy axis and the hard axis for the dual-type Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/CoFe/Cu/CoFe/Ta multilayer at (a) room temperature and (b) 77 K.

4.3%와 3.4%로 박막시료의 형상 자기 이방성을 나타내는 효과로 하여금 발생하는 AMR 효과가 제거된 상태로 자화 용이축으로 측정된 자기저항 특성보다 낮음을 보여주었다.

액체질소 온도(77 K)에서 측정된 Fig. 3(c), 3(d)에서는 Fig. 3(a), 3(b)와 마찬가지로 H_{ex} 는 거의 나타나지 않았으며, 자화 용이축인 경우 H_{c1} 는 370 Oe, H_{c2} 는 45 Oe, MR_1 는 6.0%와 MR_2 는 6.3%로 자화 곤란축인 경우 H_{c1} 는 425 Oe, H_{c2} 는 70 Oe, MR_1 과 MR_2 는 각각 7.2%와 8.9%로 각각 상온에서 보다 약 1.2~1.5배 향상된 자기저항 특성을 보였다. 저온에서 자성금속체인 강자성체 내 전자들의 스핀의 존산란효과의 증가로 인해 MR 비의 향상과 MR 곡선에서 나타난 피크값 부근에서 상온일 때는 완만한 형태이었으나 77 K에서는 뾰족한 형태를 보였다. 자화 곤란축 방향으로 측정된 Fig. 3(d)에서 얻은 H_{ex} , H_{c1} , H_{c2} 는 Fig. 3(b)와 같은 값을 나타내었고, MR_1 과 MR_2 는 각각 5.6%와 6.1%로 자화 용이축에서 측정된 보자력과 자기저항비로 향상된 특성이 비슷함을 알 수 있었다.

Fig. 4(a)와 4(b)는 이중구조를 갖는 Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm) 스핀밸브 다층박막에 대하여 자화 용이축과 자화 곤란축으로 각각 상온에서 측정된 MR 곡선들이다. 이중구조를 갖는 PtMn 기반 GMR-SV 다층박막에서 동일한 SV 다층박막과 상부 PtMn층이 모두 거의 같은 교환결합세기나 보자력, 자기저항비 등의 자기

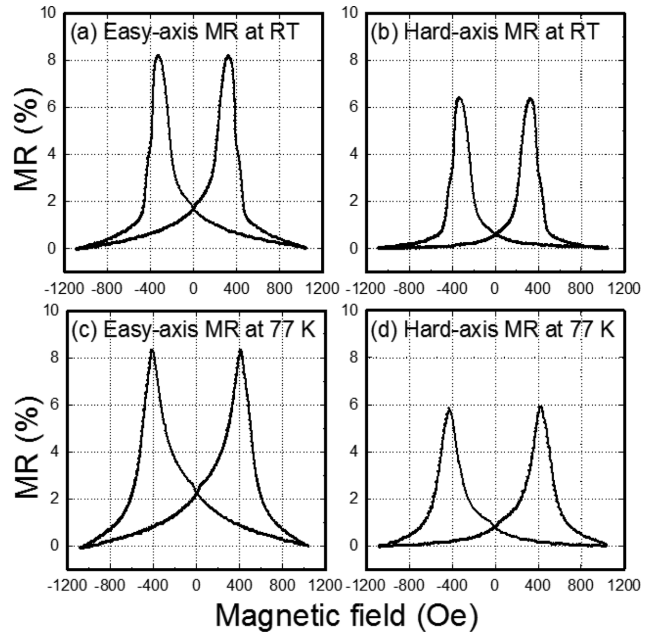


Fig. 4. Major MR curves according to the easy axis and the hard axis for the double-type Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta multilayer at (a) room temperature and (b) 77 K.

저항 특성을 갖는 겹쳐진 나비 날개 형태로 나타내었다. 두 개의 MR 곡선들에서 얻은 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 0 Oe, 375 Oe, 6.4%~8.3%으로, 자화 용이축 방향으로 측정된 자기저항비가 AMR 효과를 보여주므로 자화 곤란축 보다 1.3 배 높게 나타내었다. 한편, 77 K에서 측정된 Fig. 4(c)와 4(d)에서 보여주듯이 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 0 Oe, 410 Oe, 6.0%~8.3%으로 나타내어 향상된 보자력과 피크값 부근이 뾰족한 모양은 같으나 교환결합세기와 자기저항비는 이중구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV 다층박막의 자기저항 특성들과 달리 약간 감소하거나 변화하지 않았다.

이중 및 이층구조를 갖는 2가지 형태의 PtMn계 GMR-SV 다층박막 시료에 대한 MR 곡선은 형상 자기 이방성의 효과 보다는 Cu층과 위 아래로 분리된 각 강자성층들 간의 스핀 의존 산란 효과가 우세하게 된다. 상온과 액체질소 온도에서 자화 곤란축 방향으로 측정된 MR 곡선들인 Fig. 3(b), 3(d), 4(b), 4(d)는 자화 용이축 방향으로 측정된 MR 곡선들인 Fig. 3(a), 3(c), 4(a), 4(c)에서 보여준 H_{ex} , H_c 가 거의 동일한 값을 나타내었다. 반강자성체 PtMn층을 기반으로 하여 이루어진 GMR-SV 다층박막의 자기적 특성은 자화 용이축과 자화 곤란축으로 측정된 방향과 AMR 효과로 하여금 MR(%) 값만 다르게 나타났으나 동일한 자기 등방성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 자화 용이축과 자화 곤란축이 아닌 45° 일 때도 같은 결과를 나타내었으며, MR 곡선들이 0°에서 360°까지 자기 등방성의 특성을 유지하였다.

일반적으로 GMR-SV 박막이 자기이방성 교환결합력과 낮은 자기장 부근에서 자장감응도가 큰 특성을 띠고 있는 특징이 다양한 응용 분야에 감지센서로 활용되고 있으나, 연구결과에서 자기 등방성을 따는 효과를 나타내는 Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta GMR 스핀밸브 다층박막의 소자로서 활용을 검토하였다. 본 연구팀은 GMR-SV 박막을 2 μm 선폭을 갖는 바이오소자를 제작하여 자성비드가 결합된 적혈구 운동특성을 조사하고 선행 연구결과를 발표한 바 있다[18,19]. 단일축 방향 자기장을 인가하지 않고 수평으로는 0 Oe인 상태에서 GMR-SV 바이오 소자 수평으로 통과하는 적혈구와 결합된 초상자성체인 자성비드는 원형과 구형의 모양을 이루고 있어서 바이오 분자를 포획하기 위하여 수직 자기장 성분을 만드는 마이크로 텀 코일을 사용하였다. 수직으로 향하는 등방성 자기장이 누설 자계(stray magnetic field)가 발생시켜 자기 등방성 수평성분을 GMR-SV 소자가 감지할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구로 하여금 등방성 PtMn계 GMR-SV 다층박막이 교환바이어스가 없어도 등방성 자기장을 발생하는 생체분자의 바이오센서로 활용할 수 있음을 보여주는 연구결과를 논문을 통해 발표할 예정이다.

자기 등방성을 띠는 특성으로 이중 GMR-SV 다층박막에 대하여 액체질소 온도에서 자화 곤란축으로 측정된 Fig. 3(d)과 Fig. 4(d)에서 나타난 MR 곡선을 MH loop로 변환하여 Fig. 5(a)와 5(b)에 나타내었다[20,21]. 반강자성체 PtMn 박막이 중간층으로 삽입된 이중 GMR-SV 다층박막에 대하여 Fig. 5(a), 5(b)의 MH loop에서 각각 보여준 H_{c1} 는 425 Oe와 410 Oe로 히스테리시스 사각비가 뚜렷하게 대칭적 형태를 나눠져 나타내었다. Fig. 5(a)의 경우 중심에서 또 하나의 H_{c2} 이 70 Oe로 사각비가 뚜렷한 히스테리시스 모양을 보여주었다. 이는 중앙에서 일어난 H_{c2} 이 작은 MH loop으로 나타낸 히스테리시스는 PtMn 박막의 상부층에 있는 스핀밸브 다층박막에서 효과를 보여주었다. 그리고 중앙을 벗어나 일어난 H_{c1} 이 큰 MH loop으로 나타낸 히스테리시스는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보여준 PtMn 박막의 하부층에 있는 스핀밸브 다층박막에서 자기적 특성을 갖는 결과로 나타내었다. 이중 GMR-SV 다층박막에 대하여 강자성체 CoFe층은 반강자성체

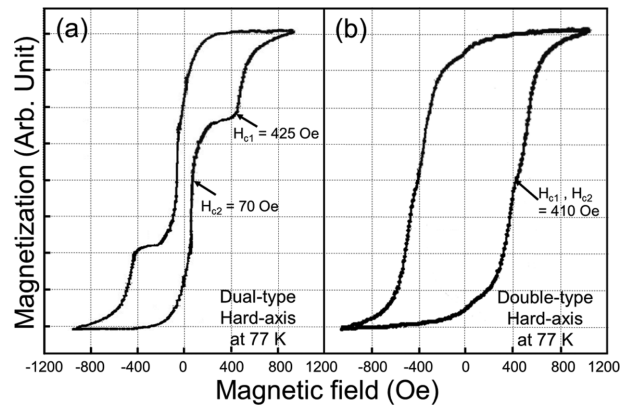


Fig. 5. Two different MH loops according to the hard axis for (a) the dual-type PtMn-SV film of Corning glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/CoFe(3 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(6 nm)/Ta(10 nm) multilayer and (b) the double-type PtMn-SV film of Corning glass/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/PtMn(6 nm)/Ta(10 nm)/CoFe(6 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(3 nm)/Ta(10 nm) multilayer.

PtMn 박막을 중간으로 하여 하부층 스핀밸브 다층박막과 상부층 스핀밸브 다층박막에 따라 변화된 각 강자성체의 자화 스핀배열을 설명할 수 있다. MR 곡선인 Fig. 3(c)와 MH loop으로 Fig. 5(a)를 서로 대응했을 때 각 강자성체 CoFe층의 스핀배열들이 반평행일 때 MR(%)는 최대값을 가지고 평행일 때 최소값을 나타내었다. 이중구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV에 대한 MH loop인 Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 동일한 2가지 형태의 자기저항 특성이 겹쳐진 것으로 상부층에 있는 PtMn계 GMR-SV의 자기저항 특성이 하부층에 있는 것보다 적층된 다층박막의 미세구조적 차이로 인한 상부층 보자력이 약간의 줄어들어 Fig. 5(a) 보다 적은 410 Oe의 값을 나타내었다.

Table I은 2가지 형태의 이중구조를 갖는 GMR-SV 구조의 자기적 특성에 대하여 상온과 77 K 온도에서 측정된 MR 곡선들부터 얻은 자기저항 특성들로 H_{ex} , H_c , MR(%)의 결과들을 요약한 것이다. 반강자성체 PtMn층과 강자성체 CoFe층에서 자기 이방성의 H_{ex} 는 유도하지 않고 모든 박막구조는 자기 등방성을 유지하고 있었다[9]. 또한 상온과 액체질소 상

Table I. Comparison of magnetic properties (H_{ex} (Oe), H_c (Oe), MR (%), surface resistance (Ω)) according to the hard axis for the dual-type GMR-SV multilayer and double-type GMR-SV multilayer based on PtMn layer according to at two different temperatures of room temperature and 77 K. Here subscripts of 1 and 2 are noticed to the bottom and the top PtMn GMR-SV multilayers, respectively.

Sample	Measuring temperature (K)	Exchange coupling field		Coercivity		Magnetoresistance ratio		Surface resistance R (Ω)
		H_{ex1} (Oe)	H_{ex2} (Oe)	H_{c1} (Oe)	H_{c2} (Oe)	MR ₁ (%)	MR ₂ (%)	
Dual-type GMR-SV with one PtMn layer	290	0	0	380	45	4.3	3.4	34.89
	77	0	0	425	70	5.6	6.1	29.14
Double-type GMR-SV with two PtMn layers	290	0	0	375	375	6.4	6.4	28.55
	77	0	0	410	410	6.0	6.0	24.73

온도(77 K)에서 측정된 2가지 형태의 이중 및 이층구조를 갖는 GMR-SV 구조를 비교분석하여 스핀의존산란 효과로 하여금 향상된 자기저항 특성들을 나타내었다.

IV. 결 론

DC 마그네토론 스퍼터링 방법으로 제작된 2가지 형태의 이중 및 이층구조를 갖는 PtMn계 GMR-SV 다층박막 시료를 상온과 액체질소 온도에서 측정된 등방성을 띠는 자기저항 특성을 조사하였다. 단일 반강자성체 PtMn층이 중간에 위치한 이중구조를 갖는 Glass/Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/CoFe/Cu/CoFe/Ta 다층박막은 하부층과 상부층 GMR-SV의 보자력이 다른 값을 가진 나비 날개 형태로 MR 곡선을 보여주었다. 자화 곤란축을 따라 측정된 MR 곡선과 MH loop에서 얻은 H_c 과 MR(%)는 각각 380 Oe, 25 Oe와 4.3 %, 3.3 %으로 두 개의 히스테리시스 사각비가 뚜렷하게 분리된 등방성 자기적 특성으로 나타내었다. 액체질소 온도 77 K에서 측정된 H_{ex} 는 거의 나타나지 않았으며, 자화 용이축인 경우 H_{c1} 는 370 Oe, H_{c2} 는 45 Oe, MR₁과 MR₂는 각각 6.0 %와 6.3 %으로 자화 곤란축인 경우 H_{c1} 는 425 Oe, H_{c2} 는 70 Oe, MR₁과 MR₂는 각각 7.2 %와 8.9 %으로 각각 상온에서 보다 약 1.2~1.5배 향상된 자기저항 특성을 보여주었다. 2개의 PtMn층으로 이루어진 이층구조를 갖는 Glass/Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta/CoFe/Cu/CoFe/PtMn/Ta 스핀밸브 다층박막을 자화 곤란축을 따라 측정된 MR 곡선과 MH loop에서 얻은 H_c 는 375 Oe이고, MR(%)는 각각 6.4 %으로 두 개의 히스테리시스 사각비가 겹쳐진 등방성을 띠는 자기적 특성을 나타내었다. 77 K에서 측정된 H_{ex} , H_c , MR(%)는 각각 0 Oe, 410 Oe, 6.0 %~8.3 %를 나타내어 향상된 보자력과 피크값 부근이 뾰족한 모양은 같으나 교환결합세기와 자기저항비는 이중구조는 갖는 PtMn계 GMR-SV 다층박막의 자기저항 특성들과 달리 약간 감소하거나 변화지 않았다. 이러한 결과는 PtMn층이 1개층 이중구조와 2개층 이층구조의 GMR-SV 다층박막에서 각 강자성체의 자화의 스핀배열로 일어나는 효과임을 설명하였다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2016R1D1A1B03936289)의 결과이다.

References

- [1] S. X. Wang and A. M. Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, Academic Press, San Diego, Chap. 6, pp. 123-176 (1991).
- [2] M. D. Cubells-Beltrán, C. Reig, J. Madrenas, A. D. Marcellis, J. Santos, S. Cardoso, and P. P. Freitas, *Sensors* **16**, 939 (2016).
- [3] M. J. Kim, H. J. Kim, and K. Y. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **11**, 72 (2001).
- [4] J. P. Noieres, S. Jaren, Y. B. Zhang, A. Zeltser, K. Pentek, and V. S. Speriosu, *J. Appl. Phys.* **87**, 3920 (2000).
- [5] S. H. Huang, C. H. Lai, C. C. Chiang, and C. H. Yang, *J. Appl. Phys.* **99**, 08R508 (2006).
- [6] M. Takiguchi, S. Ishii, E. Makino, and A. Okabe, *J. Appl. Phys.* **87**, 2469 (2000).
- [7] M. Saito, N. Hasegawa, F. Koike, H. Seki, and T. Kuriyama, *J. Appl. Phys.* **85**, 4928 (1999).
- [8] G. W. Anderson, Y. Huai, and M. Pakala, *J. Appl. Phys.* **87**, 5762 (2000).
- [9] J. G. Choi, S. H. Kim, S. H. Choi, S. S. Lee, and J. R. Rhee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 123 (2017).
- [10] C. I. Pettiford, A. Zeltser, S. D. Yoon, V. G. Harri, C. Vittoria, and N. X. Sun, *J. Appl. Phys.* **99**, 08C901 (2006).
- [11] C. C. Yu, J. C. A. Huang, and Y. D. Yao, *J. Appl. Phys.* **91**, 2730 (2002).
- [12] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 82 (2017).
- [13] P. Khajidmaa and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 193 (2013).
- [14] P. Khajidmaa, K. J. Park, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 98 (2013).
- [15] J. G. Choi and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **21**, 132 (2011).
- [16] P. Khajidmaa, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 7 (2017).
- [17] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [18] J. G. Choi, H. M. Jung, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 215 (2017).
- [19] J. G. Choi, H. M. Jung, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 649 (2017).
- [20] S. S. Lee and D. G. Hwang, *New Phys. : Sae Mulli* **37**, 314 (1997).
- [21] J. G. Choi, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **19**, 142 (2009).