

## Property of Inverse MR Ratio by Spin-Valve Effect in Superconducting YBCO/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn Multilayers

Woo-Il Yang

Department of Applied Physics and Electronics, Sangji University, Wonju 26339, Korea

Jong-Gu Choi and Sang-Suk Lee\*

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

(Received 9 November 2017, Received in final form 20 February 2018, Accepted 20 February 2018)

The antiferromagnetic IrMn based GMR-SV (giant magnetoresistance-spin valve) multilayer on the high-T<sub>c</sub> superconductor YBCO film fabricated by using ion beam deposition and dc magnetron sputtering systems. The hybrid multilayer structure performed with the typical GMR-SV film and the superconducting YBCO film was compared two different magnetoresistance curves, which are measured at a room and a liquid nitrogen temperatures below the critical temperature. The exchange biased coupling field ( $H_{ex}$ ), coercivity ( $H_c$ ), magnetoresistance ratio (MR (%)) for the pure GMR-SV multilayer measured at 77 K are enhanced to the increment values of 80 Oe, 43 Oe, and 6.6 % more than those measured at room temperature, respectively. In case of YBCO/GMR-SV multilayer, the  $H_{ex}$ ,  $H_c$ , and MR (%) are 410 Oe, 240 Oe, -4.6 % more than those measured at 77 K, respectively. The phenomenon having a negative MR (%) below the critical temperature is explained the current in plane tunneling (CIPT) effect when the resistance of the middle G layer between the high-temperature superconductor YBCO and the GMR-SV multilayer reaches a level comparable to the plane resistance of the upper metal layer.

**Keywords** : high-T<sub>c</sub> superconductor, hybrid multilayer structure, liquid nitrogen temperature, magnetoresistance ratio (MR), current in plane tunneling (CIPT)

### 초전도체 YBCO/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn 다층박막에서의 스핀밸브 효과에 의한 반전된 자기저항비 특성 연구

양우일

상지대학교 응용물리전자학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

최종구 · 이상석\*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

(2017년 11월 9일 받음, 2018년 2월 20일 최종수정본 받음, 2018년 2월 20일 게재확정)

반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV(giant magnetoresistance-spin valve) 다층박막을 이온빔 증착 시스템과 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 고온초전도체 YBCO 박막 위에 제작하였다. 전형적인 GMR-SV 박막과 초전도체 특성을 갖는 YBCO 박막이 하이브리드 형태 다층구조로 형성된 박막시료에 대해 상온에서와 임계온도 이하인 액체질소 온도 77 K에서 측정된 자기저항곡선들을 서로 비교하였다. 77 K에서 측정된 GMR-SV 다층박막의 교환결합세기와 보자력, 자기저항비는 상온 보다 각각 80 Oe, 43 Oe, 6.6 % 만큼씩 각각 향상되었다. YBCO/GMR-SV 다층박막의 경우, 교환결합세기와 보자력이 77 K에서 각각 410 Oe와 240 Oe로 향상되어 나타났으며, 자기저항비는 음(-)의 값인 -4.6 %을 보였다. 임계온도 이하에서 MR(%) 이 음(-)이 되는 현상을 고온초전도체 YBCO와 자성체 GMR-SV 사이 중간 G 층의 터널저항과 위 금속층의 면저항이 서로 비교할 정도에 이르렀을 때 나타나는 면상 터널링 전류 효과로 설명하였다.

**주제어** : 고온초전도체, 하이브리드 다층구조, 액체질소 온도, 자기저항비, 면상 터널링 전류

## I. 서 론

고온초전도체(high-Tc superconductor; HTS)와 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve; GMR-SV) 박막이 각각 발견된 이래, 초전도체-강유전체, 초전도체-반도체, 초전도체-자성체 등 이중구조를 띤 하이브리드 형태 소자가 반도체나 전자정보저장 산업 개발에 대한 응용연구가 진행되어왔다[1]. 고온초전도체와 거대자기저항의 하이브리드 형태 구조는 완전반자성체의 초전도 특성과 강자성체의 자기스핀배열 효과로 인해 복잡하고 특이한 실험적 결과가 예상되기에 이에 대한 연구결과가 꾸준히 보고되고 있다[2].

비휘발성 자기저항 메모리(magnetoresistive random access memory; MRAM) 소자는 미세한 센싱 전류에 의한 전력을 소모하기 때문에, 새로운 자기저항 읽기헤드에 활용하기 위하여 초전도체의 임계온도 이하에서 하이브리드 다층박막 구조 형태의 자기저항 특성을 조사 연구하는 것이 필요하다. 일반적으로 거대자기저항 현상의 근원은 적층된 다층박막 구조에서 비자성체 Cu 층을 사이를 두고 두 개의 강자성체 박막간의 스핀의존산란 효과로 인한 것이다[3]. 그러나 GMR-SV 다층박막 구조에서 Cu 층을 반도체나 초전도체로 대체하였을 때, 저온 초전도체인 Nb 박막 또는 고온 초전도체인 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>(YBCO) 박막의 특성이나 반도체 비정상 특성인 스핀 밸브 또는 전류 밸브 효과로 인하여 음(-)의 값인 자기저항비 특성이 나타난다는 연구결과가 보고되었다[4, 5].

금속자성체 층과 초전도체 층이 적층된 구조에서 두 개의 층 사이인 계면에서 강자성층 자화세기와 스핀 방향의 변화와 근접효과(proximity effect)로 인해 초전도 특성인 임계온도를 변화시킨다는 연구결과가 보고되었다[6, 7]. 한편으로는, 자성체와 초전도체 적층구조에서 교환결합세기를 자기스프링(magneto-spring) 효과로 설명하기 위해 Co/IrMn 이중구조의 교환결합세기에 대해 Nb 버퍼층 두께의 영향에 대한 실험결과가 보고되었다[8, 9]. 또한, 저온 초전도체인 금속 Nb 박막 두께가 10 nm 이상에서 GMR-SV 박막을 적층한 하이브리드 박막의 자기저항 특성 연구결과는 버퍼층으로써 Nb 박막이 그 역할을 감당함을 보여 주었다[10]. 초전도체 특성을 갖는 임계온도 부근에서 급격한 저항 변화로 인해 나타나는 초 거대자기저항 현상을 응용할 수 있는 자기정보 저장소자로 응용을 제안하였다[11].

본 연구는 액체질소 온도 77.4 K 이상인 임계온도를 갖는 고온초전도체 YBCO 박막을 버퍼층으로 하여 초전도체 YBCO 박막 계면 바로 위에 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막을 적층하여 하이브리드 다층 박막구조를 제조하였다. 상온에서 액체질소 온도 77 K까지 서서히 온도를 낮추어 측정된 온도-저항 특성곡선과 상온과 임계온도 이하에서 4단

자 법으로 측정된 MR 곡선으로부터 얻은 자기저항비(magnetoresistance ratio, MR(%)) 및 교환결합세기, 보자력 특성을 비교하였다. 초전도 효과를 갖는 초전도체 박막과 거대자기저항 효과를 갖는 GMR-SV 다층박막이 초전도체 박막의 외부 자기장에 따른 스핀배열 구조의 차이로 발생하는 음(-)의 값으로 반전된 자기저항비 변화를 전류 흐름 경로의 회로를 도시하여 설명하였다.

## II. 실험 방법

본 연구에 사용한 고온초전도체 YBCO 박막은 두께 0.55 μm 직경 4인치 크기인 사파이어(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 기판 위에 증착한 300 nm 박막 두께로 독일의 THEVA 회사(Theva Dünnschichttechnik GmbH, Rote-Kreuz-Str. 8, 85737 Ismaning Germany) 제품을 사용하였다. YBCO 제조 방법은 Y, Ba, Cu 조각을 담은 분리된 3개의 보트(boat)를 가열하여 증착하는 열증착법(thermal evaporation method)이었다.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YBCO 박막 위에 적층하는 NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) 다층박막인 GMR-SV 다층구조 박막 시료는 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템과 DC 마그네트론 스퍼터링(DC magnetron sputtering) 시스템을 이용하여 상온에서 적층되었다[12, 13]. 챔버의 기본진공도는 2.1 × 10<sup>-7</sup> Torr이고, Ar 개스 주입 후 증착 중 진공도는 2.3 × 10<sup>-4</sup> Torr를 유지하였다. Ta, Nb, NiFe, CoFe, Cu 박막의 경우에는 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속 전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온빔 전압 및 전류값은 각각 120 V, 30 V, 800 V, 6.0 mA 이었다[13, 14]. IrMn 박막 증착의 경우, 증착 중 진공도는 3.2 × 10<sup>-3</sup> Torr를 유지한 채, 타겟의 원자가 원형 마그네트론의 자기장 세기가 큰 쪽으로 접속되어 스퍼터링 되는 전력(electric power) 조건을 스퍼터링 전압과 전류가 각각 340 V, 70 mA로 고정하였다. 다층박막 구조로 적층되는 각층 박막들을 챔버 내 기판 홀더와 인접한 위치에 고정 장착된 수정 발진자 두께 모니터(quartz crystal oscillator thickness monitor)를 이용하여 두께를 조절하였다[14, 15].

사파이어 기판 위에 적층한 버퍼층 YBCO 박막과 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막과 코닝 유리 기판 위에 적층한 버퍼층 Ta 박막과 동일한 GMR-SV 다층박막을 4단자 법으로 자기저항(MR) 곡선을 측정하였다. 박막 시료의 평면으로 자화 용이축 방향으로 인가한 외부 자기장의 변화 MR 곡선을 상온과 고온초전도체 YBCO 박막의 임계온도 이하인 77 K에서 각각 측정하였다. 상온과 액체질소 온도인 77 K에서 측정된 MR 곡선으로부터 IrMn 층과 강자성체 CoFe 층 사이에 일어나는 교환결합세기(exchange biased coupling field,

$H_{ex}$ 와 보자력(coercivity,  $H_c$ ), 자기저항비(magnetoresistance ratio, MR(%)) 값들을 구하여 비교 분석하였다.

### III. 실험결과 및 분석

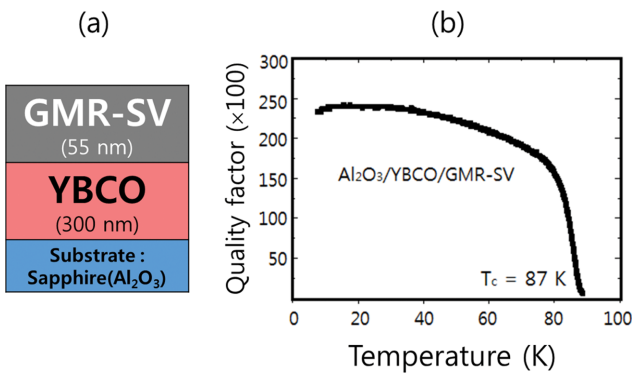
먼저 사파이어 기판 위에 증착된 300 nm 두께의 YBCO 박막에 적층한 NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) 다층박막인 GMR-SV 다층구조 박막 시료에 대해 측정 온도에 따른 마이크로파 공진기를 이용한 표면저항방법으로 초전도 특성을 조사하였다[14, 15].

초전도 특성을 측정하기 위한 Fig. 1(a)의 GMR-SV 박막 시료의 두께는 55 nm이며 면적은  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 이었다. Fig. 1(b)는 유전체 공동(cavity) 공진기(resonator)를 사용하여 공진주파수 24 GHz에서 온도에 따라 측정된 Q 값(quality factor)을 나타낸 곡선이다. Fig. 1(b)의 결과로부터 YBCO/GMR-

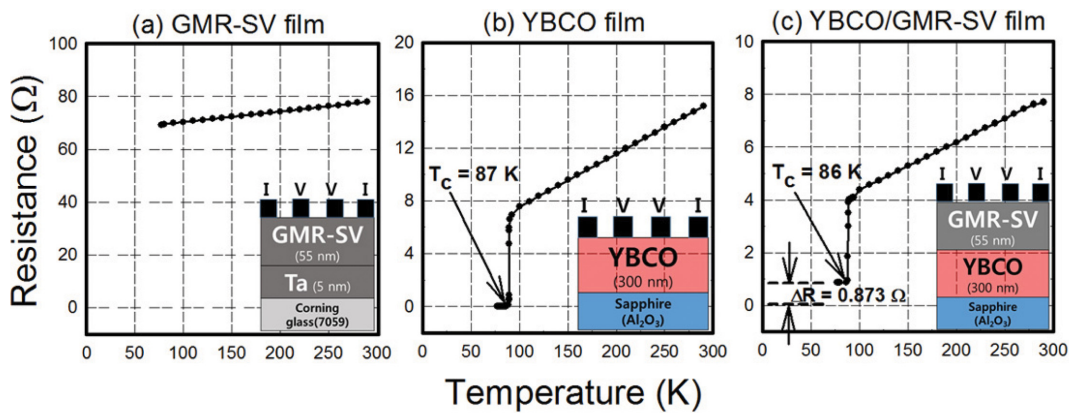
SV 다층박막의 임계 온도가 87 K로 나타났다. 이러한 결과로부터 사파이어 기판 위에 증착된 300 nm YBCO 박막과 55 nm의 GMR-SV 박막이 임계 온도 87 K 이하인 액체질소 온도 77 K에서 안정된 초전도체 특성을 유지함을 보여 주었다.

Fig. 2는 코닝 유리 위에 증착된 일반적인 형태의 Ta(5 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) 다층박막과 사파이어 위에 증착된 YBCO(300 nm) 단일박막, 그리고 사파이어 위에 증착된 YBCO(300 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) 다층박막 시료에 대한 상온에서 액체질소 온도(77 K)까지 온도가 하강할 때 4단자 법으로 측정된 3가지 저항-온도(resistance-temperature, R-T) 곡선들을 각각 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 볼 때, 상온 저항 값이 78.3 Ω에서 77 K 저항값은 69.5 Ω으로 약 8.8 Ω 정도 하강하는 전형적인 온도에 대한 금속 다층박막의 특성이 나타내었다. 단일 고온 초전도체 YBCO 박막의 경우, Fig. 3(b)의 전형적인 저항-온도 곡선에서 알 수 있듯이 Fig. 1(b)에서 마이크로파 측정법으로 얻은 임계온도와 같은 87 K로 나타났다.

하이브리드 구조 형태인 YBCO/GMR-SV 다층박막의 경우, Fig. 2(c)에서 볼 때, 상온 저항 값이 7.72 Ω에서 90 K 근처에서 저항값은 4.12 Ω으로 약 3.40 Ω 정도 선형적으로 하강하다가 87 K에서 급격히 하강하여 86 K에서 초전도체 임계 온도를 보여 주었다. 그러나 Fig. 2(b) 경우와 달리 저항 값이 완전하게 0이 되지 않고 잔류하는 내부저항(internal resistance) 값이 0.873 Ω으로 유지함을 보여 주었다. 이러한 현상은 초전도체 YBCO 박막에 균일하게 증착된 초전도체가 아닌 금속체인 GMR-SV 다층박막이 존재하여 나타난 것으로 볼 수 있다. 이러한 잔류 내부저항의 존재로 인해 자기저항 곡선을 얻을 수 있었다.



**Fig. 1.** (Color online) (a) Schematic structure of Sapphire(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/YBCO(200 nm) film and (b) Q factor having a critical temperature of 87 K for the superconductor YBCO film measured at microwave frequency of 24 GHz by using dielectric loaded cavity resonator.



**Fig. 2.** (Color online) Three R-T (resistance-temperature) curves for (a) Corning glass/Ta(5 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) film, (b) Sapphire(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/YBCO(300 nm) film, and (c) Sapphire(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/YBCO(300 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) film measured by using four probe method. Insets: schematic structures and 4-probe electrodes for the different three types.

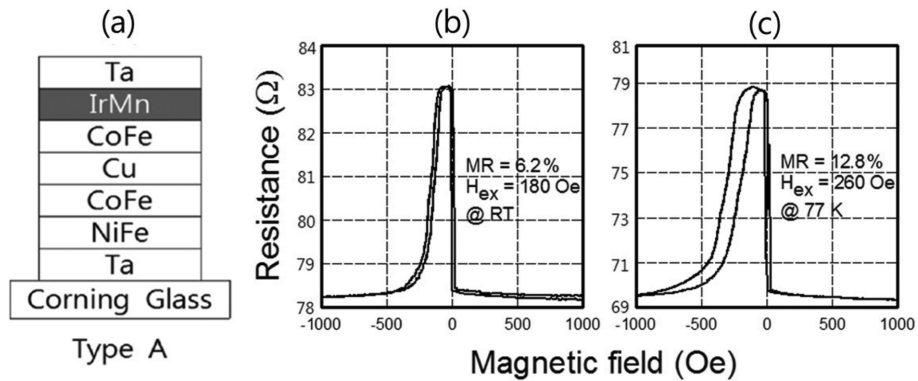


Fig. 3. (a) Multilayer structures of Type A: Glass/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta and MR curves at (b) room temperature and (c) 77 K.

코닝 유리 위에 Fig. 3(a)에 보여준 다층박막 구조인 Ta(5 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm)을 제조하고 상온에서와 액체질소 온도 77 K에서 측정된 자기저항 곡선들을 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 각각 나타내었다. 온도가 다른 두 개의 자기저항곡선들을 비교하여 볼 때, 자기저항비(MR), 반강자성체 IrMn과 인접한 강자성체 CoFe 고정층간의 교환결합세기( $H_{ex}$ )와 보자력( $H_c$ ) 값 들은 상온에서 MR = 6.2%,  $H_{ex}$  = 180 Oe,  $H_c$  = 20 Oe 이지만, 77 K에서 MR = 12.8%,  $H_{ex}$  = 260 Oe,  $H_c$  = 63 Oe 로 모두 크게 향상됨을 보였다.

사파이어(sapphire,  $Al_2O_3$ ) 위에 증착된 YBCO(300 nm) 박막 위에 Fig. 4(a)에 보여준 다층박막 구조인 NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm)을 제조하고 상온에서와 액체질소 온도 77 K에서 측정된 자기저항 곡선들을 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에 각각 나타내었다. 특히 Fig. 4(b)에서 MR 값이 계단형으로 나타난 이유는, Fig. 2(c)의 R-T 곡선에서 비록 초전도체 YBCO 임계온도 이하인 77 K에서 완전한 0의 저항값이 아닌 GMR-SV 박막

의 매우 낮은 내부저항 값인  $0.873 \Omega$ 의 존재 때문인 것으로 보여진다. 따라서, 온도가 다른 두 개의 자기저항곡선들을 비교하여 볼 때, 자기저항비(MR), 반강자성체 IrMn과 인접한 강자성체 CoFe 고정층간의 교환결합세기( $H_{ex}$ )와 보자력( $H_c$ ) 값 들은 상온에서 MR = 2.6%,  $H_{ex}$  = 240 Oe,  $H_c$  = 45 Oe 이지만 77 K에서 MR = -4.5%,  $H_{ex}$  = 410 Oe,  $H_c$  = 240 Oe 로 모두 크게 향상 됨을 보였다. 여기서 자기저항비인 MR은 반전된 값을 나타내 서론에서 언급한 GMR-SV 다층박막 구조에서 Cu 층을 반도체나 초전도체로 대체하였을 때와 같은 음(-)의 값의 자기저항비 특성을 갖는 결과를 보여 주었다.

한편 본 연구팀이 참고문헌[5]에 보고 하였던 유사한 반전된 자기저항비의 존재를 보여준 연구결과의 하나로 MgO(100) 기판 위에 스퍼터링 법으로 제조한 YBCO(100 nm)/NiO(40 nm)/NiFe(5 nm)/Cu(3 nm)/NiFe(6 nm) GMR-SV 다층박막 구조와 상온과 77 K에서 측정된 자기저항곡선을 Fig. 5(a), 5(b), 5(c)에 각각 나타내었다.

온도가 다른 두 개의 자기저항곡선들인 Fig. 5(b)와 5(c)를 비교하여 볼 때, 양의 값에서 음의 값으로 반전된 자기저

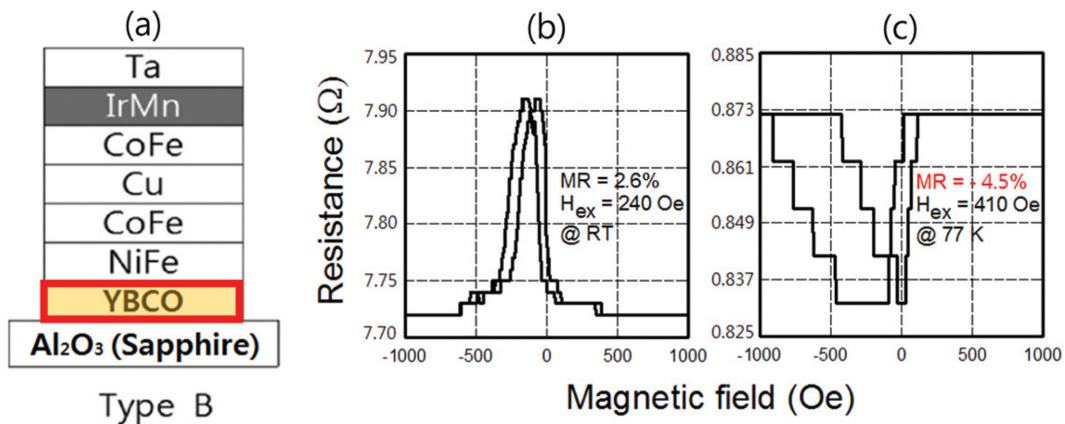
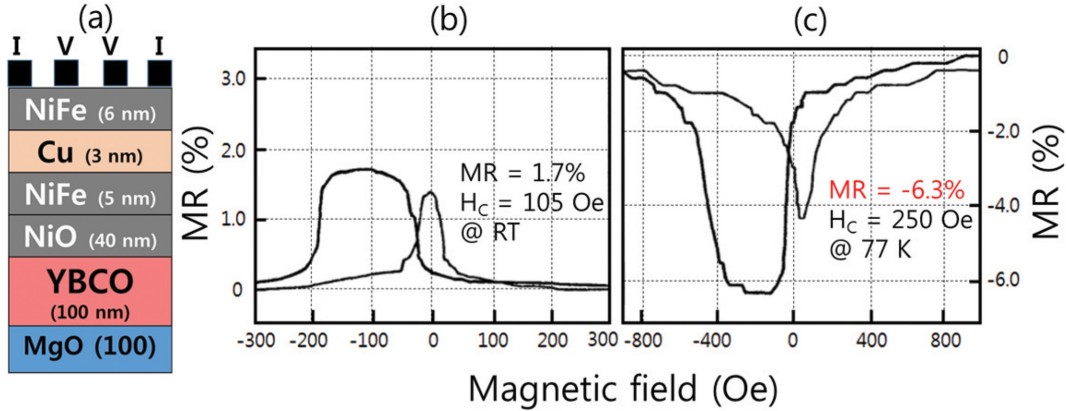


Fig. 4. (Color online) (a) Multilayer structure of Type B: Sapphire( $Al_2O_3$ )/YBCO/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta and MR curves at (b) room temperature and (c) 77 K.



**Fig. 5.** (Color online) (a) Schematic structure of MgO(100)/YBCO/NiO/NiFe/Cu/NiFe multilayer. Normal and inverse magnetoresistance ratios versus magnetic field curves of superconducting YBCO/NiO GMR-SV at (b) room temperature and (c) 77 K (Ref. [5]), respectively.

**Table I.** Magnetoresistance properties (exchange bias coupling field  $H_{ex}$  (Oe), coercivity  $H_c$  (Oe), magnetoresistance ratio MR (%)) of MR curves for the Glass/Ta/IrMn based GMR-SV, Sapphire/YBCO/IrMn based GMR-SV multilayer, and MgO/YBCO/NiO based GMR-SV multilayer measured at room temperature and 77 K.

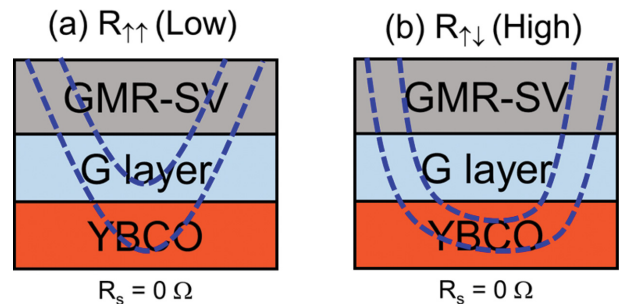
Film type	Measuring temperature	$H_{ex}$ (Oe)		$H_c$ (Oe)		MR(%)
		Pinned layer	Pinned layer	Pinned layer	Pinned layer	
Glass/Ta/IrMn based GMR-SV multilayer	290 K	180	20	6.2 %		
	77 K	260	63	12.8 %		
Sapphire/YBCO/IrMn based GMR-SV multilayer	290 K	240	45	2.6 %		
	77 K	410	240	-4.6 %		
MgO/YBCO/NiO based GMR-SV multilayer	290 K	105	85	1.7 %		
	77 K	250	255	-6.3 %		

항비(MR), 반강자성체 IrMn과 인접한 강자성체 CoFe 고정층간의 교환결합세기( $H_{ex}$ )와 보자력( $H_c$ ) 값 들은 상온에서  $MR = 1.7\%$ ,  $H_{ex} = 105$  Oe,  $H_c = 85$  Oe이지만 77 K에서  $MR = -6.3\%$ ,  $H_{ex} = 250$  Oe,  $H_c = 255$  Oe로 모두 크게 향상 됨을 보였다.

Table I은 서로 다른 3가지 다층박막 형태로 Fig. 3, Fig. 4. Fig. 5에서 보여준 각 MR 곡선들로부터 얻은 자기저항 특성들 정리한 것이다. 앞에서 언급하였듯이 서로 다른 3가지 형태의 GMR-SV의 온도가 하강하여 액체질소 온도에서 계면간의 스핀의존산란 효과는 강해져서 자기저항비(MR(%)), 교환결합세기( $H_{ex}$ ), 보자력( $H_c$ )의 절대값은 크게 향상된 자기저항 특성을 띠고 있음을 알 수 있다. 순수한 GMR-SV 다층박막의 교환결합세기와 보자력, 자기저항비는 상온에서 보다 각각 80 Oe, 43 Oe, 6.6% 만큼씩 각각 향상되었다.

YBCO/GMR-SV 다층박막의 경우에는 교환결합세기와 보자력이 각각 170 Oe와 195 Oe로 향상되었으며, 자기저항비는 음(-)의 값인 -4.6%으로 나타났다. 그리고 초전도체와 자성체 GMR-SV 다층박막 구조에 대한 임계온도 이하인 77 K

에서 MR(%) 값이 모두가 반전된 음(-)의 값을 갖는 것이 매우 특이한 연구 결과를 재현한 것이다. 초전도 특성과 GMR-SV 다층박막의 전류의 흐름이 스핀밸브 층에서 강자성체들 간의 스핀 배열의 평행과 반평행에 따른 전류 흐름 경



**Fig. 6.** (Color online) Schematic explanation for the existence of minus (-) magnetoresistance ratio (MR (%)) caused by the different current paths having spin valve effect for the hybrid type of superconductor and GMR-SV according to two states (a)  $R_{\uparrow\uparrow}$  (Low) and (b)  $R_{\uparrow\downarrow}$  (High). Here, a G layer and a blue dot line are a middle layer with resistance between the high-temperature YBCO superconductor layer and the metal layer GMR-SV and a current flow in plane tunneling, respectively.

로가 Fig. 6에서 설명할 조합된 회로의 특성에 기인 할 것으로 보여진다.

본 연구팀에서는 먼저 MgO(100)/YBCO/NiO/NiFe/Cu/NiFe 다층박막의 경우, 고온초전도체 YBCO 박막과 계면 인접한 반강자성체이자 부도체 역할을 하는 NiO 박막으로 전류가 누설되어 초전도 상태로 저항값이 갑자기 0이 되어 흐르는 전류밸브(current valve) 스위칭 효과에 기인한다고 설명하였다. 이러한 연구결과로부터 Sapphire/YBCO/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층박막에서 측정된 Fig. 4(c)의 MR 곡선에서 임계온도 근처에서 금속과 초전도체의 계면에서 일어나는 근접 효과로 초전도체의 임계온도 값 변화는 미미할 것이다.

고온초전도체와 금속층 GMR-SV 사이에 저항이 있는 중간층인 G 층이 존재하고, 저항이 꽤 있는 것으로 표현할 경우 [18], 면상 터널링 전류(current in plane tunneling; CIPT) 효과로 음(-) GMR을 설명할 수 있다[19]. 그 원리는 Fig. 6과 같이 전류의 흐름을 굽은 푸른 점선으로 표현하였다.

CIPT 원리에 따라 설명하면, Fig. 6(a)처럼 위에 위치한 금속층인 GMR-SV의 저항이 작아 전류가 금속층을 타고 많이 흐르게 된다. 이 경우 등전위선은 촘촘해져서, 즉 전압이 높게 측정된다. Fig. 6(b)의 경우에는 금속층 GMR-SV의 저항이 커지면서 초전도체와 금속면 사이에 위치한 G 층을 통해 초전도체로 전류가 흘러들어가 전도 되는 것이 더 전도가 쉬워지게 된다. 이 경우 Fig. 6(b)처럼 전류가 흐르게 되고, 많은 전류가 초전도체를 통해 흐르기에 등전위면 사이는 멀어지게 된다. 즉 전압이 낮게 측정된다.

따라서, 본 실험은 G 층의 터널저항(혹은 면저항)과 위 금속면의 면저항이 서로 비교할 정도에 이르렀을 때 나타나는 현상으로서, Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM) 개발업체에 고가로 납품되는 CIPT 자기저항 측정 장치의 원리이기도 하다. G 층이라는 것이 초전도체와 일반 금속사이에 존재한다는 사실과, 이 G 층의 저항값을 CIPT 기법으로 환산할 수 있다는 면에서 이 연구결과는 매우 의미가 있다고 사료된다.

#### IV. 결 론

반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막을 이온빔 증착 시스템과 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 고온초전도체 YBCO 박막 위에 증착하였다. 유전체 공진기를 사용하여 온도에 따라 측정된 Q값을 나타낸 곡선으로부터 YBCO/GMR-SV 다층박막의 임계 온도가 87 K로 나타났다. 하이브리드 구조 형태인 YBCO/GMR-SV 다층박막의 경우, 상온 저항 값이 7.72 Ω에서 90 K 근처에서 저항값은 4.12 Ω으로 약 3.40 Ω 정도 선형적으로 하강하다가 87 K에서 급격

히 하강하여 86 K에서 초전도체 임계온도를 보이며 잔류하는 내부저항 값이 0.873 Ω으로 유지하였다.

전형적인 GMR-SV 박막과 초전도체 특성을 갖는 YBCO 박막이 하이브리드 형태 다층구조를 형성하여 상온에서와 임계온도 이하인 액체질소 온도 77 K에서 측정된 자기저항곡선들을 비교하였다. 순수한 GMR-SV 다층박막의 교환결합세기와 보자력, 자기저항비는 상온에서 보다 각각 80 Oe, 43 Oe, 6.6 % 만큼씩 각각 향상되었다. YBCO/GMR-SV 다층박막의 경우에는 교환결합세기와 보자력이 각각 170 Oe와 195 Oe로 향상되었으며, 자기저항비는 음(-)의 값인 -4.6 %으로 나타났다.

초전도체가 아닌 자성체 GMR-SV 박막이 임계온도 이하에서 MR(%)가 음(-)이 되는 현상을 고온초전도체와 금속층 GMR-SV 사이에 저항이 있는 중간층인 G 층의 터널저항(혹은 면저항)과 위 금속면의 면저항이 서로 비교할 정도에 이르렀을 때 나타나는 면상 터널링 전류(CIPT) 효과로 설명하였다.

#### 감사의 글

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

#### References

- [1] Y. Zhu, A. Pal, M. G. Blamire, and Z. H. Barber, *Nat. Mater.* **16**, 195 (2017).
- [2] B. Li, N. Roschewsky, B. A. Assaf, M. Eich, M. Epstein-Martin, D. Heiman, M. Müntzenberg, and J. S. Moodera, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 097001 (2013).
- [3] T. J. Hwang and D. H. Kim, *Prog. Supercon. Cryo.* **19**, 23 (2017).
- [4] J. Zhu, X. Cheng, C. Boone, and I. N. Krivoroto, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 027004 (2009).
- [5] S. S. Lee, J. R. Rhee, D. G. Hwang, and K. Rhie, *J. Magn.* **6**, 83 (2001).
- [6] S. W. Han, *J. Korean Magn. Soc.* **22**, 66 (2012).
- [7] H. W. Lean and J. R. Waldram, *J. Phys.: Condens. Matter* **1**, 1229 (1989).
- [8] M. Z. Iqbal, G. Hussain, S. Siddique, and M. W. Iqbal, *J. Magn. Magn. Mater.* **432**, 135 (2017).
- [9] T. C. Freitas, J. L. Gonzalez, V. P. Nascimento, and E. C. Pasamani, *Thin Solid Films* **611**, 33 (2016).
- [10] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 82 (2017).
- [11] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *New Physics: Sae Mulli* **67**, 1035 (2017).

- [12] H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper, *J. Vac. Sci. Tech.* **21**, 725 (1982).
- [13] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [14] P. Khajidmaa, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 7 (2017).
- [15] 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).
- [16] J. H. Lee, W. I. Yang, M. J. Kim, James C. Booth, K. Leong, S. Schima, David Rudman, and S. Y. Lee, *IEEE Trans. Appl. Super.* **15**, 3700 (2005).
- [17] K. Agatsuma, H. Tateishi, K. Arai, T. Saitoh, N. Sadakata, and M. Nakagawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 1580 (1997).
- [18] O. P. Lednyov and V. A. Frolov, *Problems of Atomic Science and Technology (VANT), Series Nuclear Physics Research: Theory and Experiment* **7**, 15 (1989).
- [19] D. C. Worledge and P. L. Trouilloud, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 84 (2003).