

## Current Transfer Effect by the Gap Layer between High-Tc Superconductor and Giant Magnetoresistance-Spin Valve

Woo-II Yang

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

Byeong-Uk Kang, Jong-Gu Choi, Purevdorj Khajidmaa, and Sang-Suk Lee\*

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

(Received 13 September 2018, Received in final form 1 October 2018, Accepted 1 October 2018)

A giant magnetoresistive - spin valve (GMR-SV) NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta multilayer film was fabricated by ion beam deposition on a commercial high - temperature superconductor  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) film. The thickness of the hybrid YBCO thin film was 300 nm and one of the antiferromagnetic IrMn-based GMR-SV thin film was 55 nm. The superconductor characteristics of the YBCO thin films were confirmed by the R-T curve measured with 4-terminal and the Q-T and I-V curves measured with a microwave cavity resonator. In particular, the phenomenon of negative magnetoresistance (MR) ratio in the reversed MR curve of  $-7.4\%$  is explained by the current transfer effect from the MR and the I-V curves measured by the 2-, 3-, and 4-probe methods at 77 K below the critical temperature. It was also confirmed by SEM image that a gap layer of 9.3 nm was present between the YBCO film and the GMR-SV multilayer. The residual resistance of  $0.456\ \Omega$  was measured due to the presence of the gap layer and the difference in current transfer was caused by the superconductor depending on the change of the spin magnetization array configuration of GMR-SV.

**Keywords :** hybrid, critical temperature, residual resistance, gap layer, current transfer effect

## 거대자기저항-스핀밸브와 고온초전도체 사이에 있는 틈 층에 의한 전류전달효과 특성연구

양우일

상지대학교 응용물리전자학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

강병욱 · 최종구 · 카지드마 · 이상석\*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

(2018년 9월 13일 받음, 2018년 10월 1일 최종수정본 받음, 2018년 10월 1일 게재확정)

상용화된 고온초전도체  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막 위에 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve, GMR-SV) NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층박막을 이온빔 증착법으로 제작하였다. 하이브리드 YBCO 박막의 두께는 300 nm이고 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막의 두께는 55 nm이었다. YBCO 박막의 초전도체 특성을 임계온도와 임계전류밀도는 4-단자로 측정된 R-T 곡선, 마이크로파 공진기로 측정된 Q-T 곡선과 I-V 곡선으로 확인하였다. 특히 반전된 MR 곡선에서 나타난 음의 자기저항비가  $-7.4\%$ 가 되는 현상을 임계온도 이하인 액체질소 온도에서 2-단자, 3-단자, 4-단자 방법으로 측정된 자기저항 곡선과 I-V 곡선으로부터 전류전달효과로 설명하였다. 또한 YBCO 박막과 GMR-SV 박막 사이에 9.3 nm의 두께의 틈 층(gap layer, G layer)이 존재함을 SEM 영상으로 확인하였다. G 층의 존재로 인해 내부  $0.456\ \Omega$  크기의 잔류저항이 측정되었으며, GMR-SV의 스핀자화 배열의 변화에 의존하는 초전도체로 전류전달의 차이를 발생시켰다.

**주제어 :** 하이브리드, 임계온도, 잔류저항, 틈 층, 전류전달효과

## I. 서 론

일반적으로, 다층 박막 구조에서의 거대자기저항(giant magnetoresistance, GMR) 현상의 기원은 비자성체 Cu 층에 의해 분리된 2개의 강자성 필름 사이의 스핀 의존 산란 효과에 기인한다[1]. 초전도체-강유전체, 초전도체-반도체 및 초전도체-자성체 물질의 이중 구조와 이러한 하이브리드 형태의 장치 개발에 응용될 수 있는 고온초전도(high Tc superconductor, HTS) 및 거대 자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance, GMR-SV) 구조가 연구되어 오고 있다[2]. HTS 및 GMR-스핀밸브(spin valve, SV) 하이브리드 구조는 완벽한 반자성 물질의 초전도 특성 및 강자성체의 자기 스핀배열 효과로 인해 독특한 특성을 나타낼 것으로 기대된다.

하이브리드 다층 구조를 이용한 새로운 나노 자성소자를 개발하기 위해서는 자기저항 특성을 초전도체의 임계온도(critical temperature,  $T_c$ ) 이하에서 조사할 필요가 있다. GMR-SV 다층구조의 Cu 층을 반도체 또는 저온 초전도체 Nb 박막, HTS  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막 등으로 대체 한 경우, 비정상적인 스핀을 가진 반도체의 특성으로 인해 음의 자기저항비(magnetoresistance ratio, MR(%))가 얻어졌음이 보고되었다[3,4]. 금속 자성체 및 초전도체 층으로 구성된 구조물에 있어서, 강자성층의 자화 세기 및 스핀 방향, 계면에서의 근접 효과(proximity effect)로 인해 초전도체 특성인  $T_c$ 가 변화되는 것으로 보고되었다[5,6]. YBCO 박막과 GMR-SV 다층박막을 혼합 한 하이브리드 다층박막 구조는 초전도 현상과 외부 자계에 따른 스핀 배열 구조의 차이로 인한 면상 전류 터널링 효과가 있는 것으로 연구 보고하였다[7].

본 연구는 액체질소(liquid nitrogen, LN<sub>2</sub>) 온도보다 높은  $T_c$ 를 갖는 초전도체 YBCO 박막 위에 반강자성체 IrMn 계 GMR-SV 구조를 적층한 하이브리드 다층박막 구조를 시료로 사용하였다. 상온에서 77 K까지 저항의 온도 의존성을 조사하고 상온과 77 K에서 2-, 3-, 4-단자(probe) 방법을 사용하여 얻은 각각 자기저항(magnetoresistance, MR) 곡선과 I-V 곡선을 측정하였다. 측정된 MR 곡선을 분석하여 HTS와 GMR-SV 박막을 통과하는 전류전달 특성을 논의하였다.

## II. 실험 방법

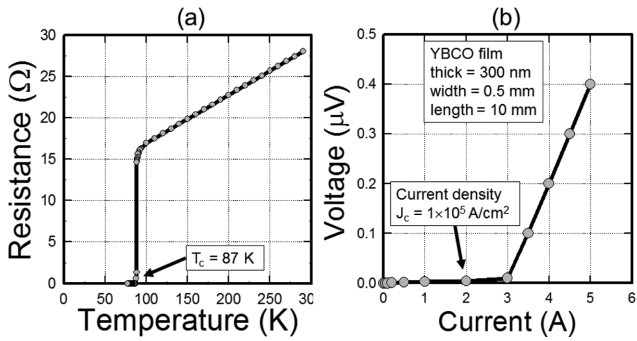
사용된 고온초전도체 YBCO 박막 시료는 독일의 THEVA 회사(Theva Dünnschichttechnik GmbH, Rote-Kreuz-Str. 8, 85737 Ismaning Germany) 제품으로 두께 0.55 mm, 직경 4 인치 크기인 사파이어( $Al_2O_3$ ) 기판 위에 Y, Ba, Cu 조각을 담은 분리된 3개의 보트(boat)를 가열하는 동시 열증착법(Thermal co-evaporation method)으로 300 nm 박막 두께로

제작한 것이다. 상용화되어 공급한 YBCO 박막의 중요사항으로는 임계온도( $T_c$ )는 88 K이고 임계전류밀도( $J_c$ )는 액체질소 온도인 77 K에서  $2.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>이었다. 한편 YBCO 두께 700 nm에 대해 온도 77 K와 마이크로 주파수 10 GHz에서 표면저항(surface resistance,  $R_s$ )는 300  $\mu\Omega$  이하였다. 30일 이상 상온 공기 중에서 보관한 고온초전도체 박막 위에 NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층구조인 하이브리드 YBCO/GMR-SV 박막 시료는 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템을 이용하여 상온에서 적층되었다[8,9]. 이온빔 증착 챔버의 기본진공도는  $2.1 \times 10^{-7}$  Torr이고, Ar 개스 주입 후 증착 중 진공도는  $2.3 \times 10^{-4}$  Torr를 유지하여 Ta, NiFe, CoFe, Cu, IrMn 박막을 해당 타겟을 회전시켜 독립적으로 적층하였다. 박막의 제작과정에서 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속 전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온빔 전압 및 전류값은 각각 120 V, 30 V, 800 V, 6.0 mA으로 고정하였다. 다층박막 구조로 적층되는 각층 박막들은 챔버 내 기판 홀더와 인접한 위치에 온도 12 °C를 유지한 냉각수가 흐르는 Cu 관에 고정되어 장착된 수정 발진자(quartz crystal oscillator)로 박막 두께를 조절하여 NiFe(40 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(25 nm)/Ta(5.5 nm) 다층구조를 제작하였다.

하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막 시료의 MR 곡선과 I-V 곡선은 2-단자 혹은 3-단자, 그리고 4-단자 탐침방법으로 상온과 액체질소 온도에서 각각 측정하였다. 측정된 major MR 곡선으로부터 반강자성체 IrMn 층과 강자성체 CoFe 층 사이에 일어나는 교환결합세기(exchange coupling field,  $H_{ex}$ )와 보자력(coercivity,  $H_c$ ), 그리고 MR(%) 값들을 구하였다. 하이브리드 구조 다층박막 시료의 표면과 단면 형상구조는 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM)으로 관찰하였다. 하이브리드 YBCO/GMR-SV 박막의 표면위에 전극 패드는 인듐과 은 풀(silver paste)를 이용하여 4개의 단자를 형성하였다. YBCO 단일박막의 초전도 특성 관찰 및 하이브리드 박막시료의 전류전달효과 특성 조사를 위해 2-단자, 3-단자, 그리고 4-단자 중에서 필요에 따라 단자를 선택하였다.

## III. 실험결과 및 토의

사파이어 단결정( $Al_2O_3$ ) 기판을 온도 600 °C 이상 유지하고 고진공 챔버내 3개의 보트(boat)에 고순도 Y, Ba, Cu 알갱이(pellet)를 열을 가하여 동시 증발시켜 산소(O<sub>2</sub>) 분위기하에서 제작한  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막을 고온초전도체(high Tc superconductor, HTS) 특성을 확인하였다. 저항-온도(resistance-temperature, R-T) 곡선인 Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이, 상온에서 4-단자 저항이 28.0  $\Omega$ 의 약 1/2이 되는

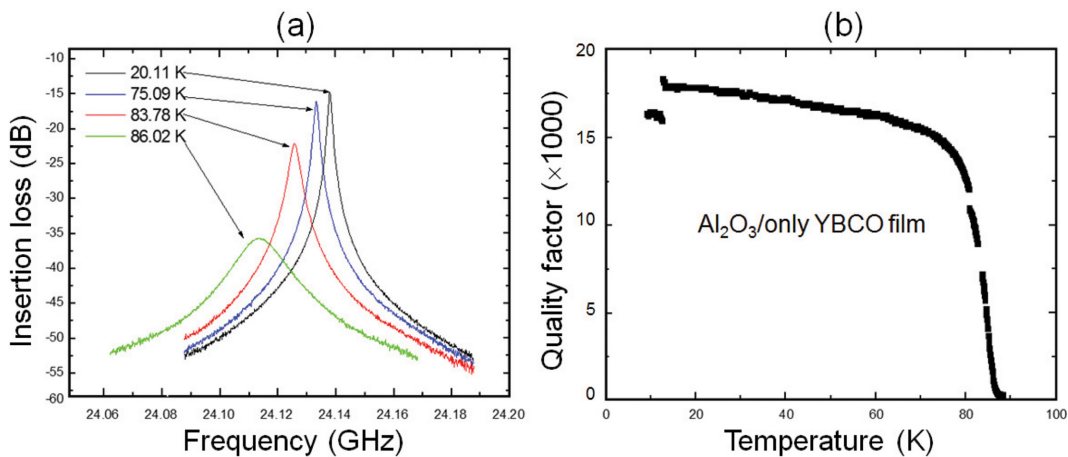


**Fig. 1.** (a) An R-T curve and (b) an I-V curve of  $T_c$  and  $J_c$  measurement for only YBCO film deposited on the sapphire ( $Al_2O_3$ ) substrate. The dimension of sample is a thick of 300 nm, a width of 0.5 mm, and a length of 10 mm. Here, the values of  $T_c$  and  $J_c$  are 87 K and  $1.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>, respectively.

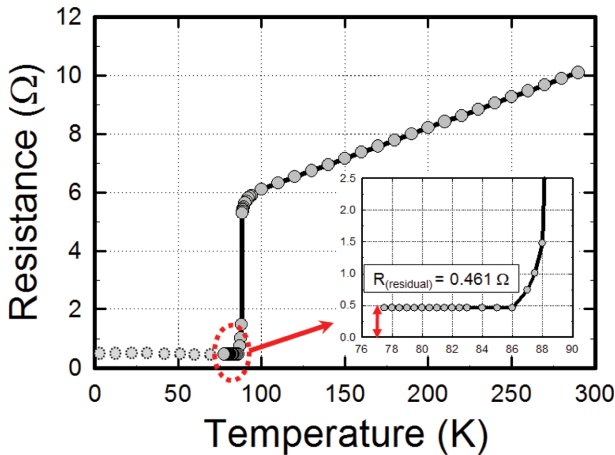
14.65 Ω를 나타낸 온도는 88.5 K이었다. 또한 YBCO 박막이 완전 0 Ω인 임계온도(critical temperature,  $T_c$ )는 87 K임을 보여 주었다. 또한 Fig. 1(b)에서 보여준 77 K에서 측정된 전류-전압(current-voltage, I-V) 곡선은 초전도를 보장하는 데 매우 중요하다. 임계온도 박막의 샘플 치수는 300 nm의 두께, 0.5 mm의 폭 및 10 mm의 길이 이었다. 여기서, 인가전류 2 A에서 계산된  $J_c$ 의 값은  $1.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>이었다. 77 K에서 YBCO 박막의 I-V 곡선은 일반적으로 주변 자기장하에서  $V \sim I^n$ 이며  $n > 10$ 의 조건을 만족하였다[10]. 따라서 I-V 곡선을 측정하여 전류 밀도  $J_c$ 가  $1.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>보다 큰 양질의 YBCO 박막이 초전도체임을 확인하였다. 실제로 MR 곡선을 측정하기 위한 4단자에서 공급되는 전류는 1.0 mA~10.0 mA이며 이에 해당한 측정 전류밀도  $J_c$ 는  $0.1 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>~ $1.0 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>이다.

Fig. 2(a)는 유전체 공동(cavity) 공진기를 이용하여 면적  $2 \times 2$  cm<sup>2</sup>과 두께 550 μm인  $Al_2O_3$  기판 위에 두께 300 nm로 증착된 YBCO 박막의 마이크로파 GHz 주파수 대역에 대한 여러 가지 온도인 20.11 K, 75.09 K, 83.78 K 및 86.02 K에서의 삽입손실(insertion loss)(dB) 특성을 나타낸 것이다[11]. Fig. 2(a)에서 온도가 내려갈수록 공진주파수는 24.113 GHz에서 24.138 GHz로 증가하면서 공진특성은 점점 향상되는 것으로 나타났다. 측정 온도 7 K에서 90 K까지 범위에서 마이크로파 공진기를 이용한 표면저항방법으로 초전도 특성을 조사한 Fig. 2(b)의 경우, 24 GHz 대의 주파수에서 측정된 마이크로파 Q 인자(quality factor) 특성을 나타낸 것이다. 이때 유전체 공진기는 YBCO 박막의 임계온도 측정을 위하여 매우 강하게 커플링 하였다. YBCO 박막 시료의  $T_c$ 는 Fig. 2(b)의 결과로부터 Fig. 1(a)에서 보여준  $T_c$  값과 동일한 87 K로 나타났다. 이러한 결과로부터 사파이어 기판 위에 증착된 300 nm YBCO 박막이  $T_c = 87$  K 이하인 액체질소 온도 77 K에서 안정된 초전도체 특성을 유지함을 알 수 있다.

본 연구의 실제적인 시료인 하이브리드 형태인 고온초전도체-거대자기저항 스핀밸브 다층박막 구조는  $Al_2O_3/YBCO(300$  nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm)이다. 이러한 YBCO/GMR-SV 다층구조를 갖는 박막시료에 대한 R-T 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 상온에서 저항 값이 10.08 Ω에서 90 K 근처에서 저항값은 5.63 Ω으로 약 4.37 Ω 정도 차이 값으로 하강하는 온도에 따라 균등하게 선형적으로 감소 하다가 87 K에서 저항이 급격히 떨어져 86 K에서 초전도체  $T_c$ 와 같은 온도에서 저항 값이 완전하게 0이 떨어지지 않고, 내부저항(internal resistance)이 존재하는 잔류저항(residual resistance,  $R_{(residual)}$ ) 값이 0.461 Ω으



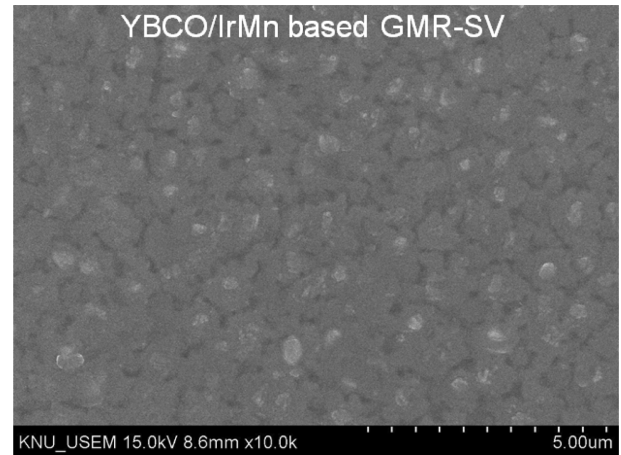
**Fig. 2.** (Color online) (a) An insertion loss of dB unit at several temperatures (20.11 K, 75.09 K, 83.78 K, and 86.02 K) versus microwave frequency of GHz and (b) a microwave Q factor-T curve at a fixed frequency of 24.0 GHz for the  $Al_2O_3$ /only YBCO film using dielectric loaded cavity resonator. This Q-T curve shows the critical temperature of 87 K.



**Fig. 3.** (Color online) Two R-T curves for the sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/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 4-probe method. Inset: The detailed R-T curve denoted by the red bold dashed circle in the region of 77 K~88 K. The value of residual resistance ( $R_{\text{residual}}$ ) is 0.461  $\Omega$

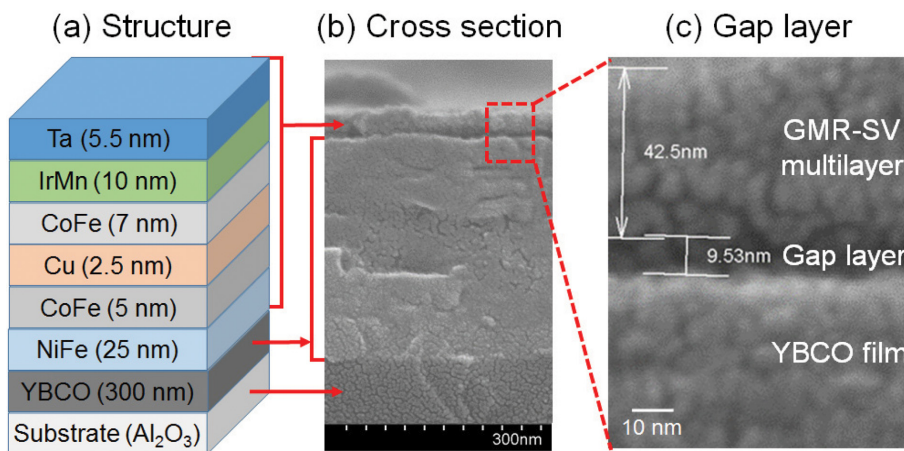
로 액체질소 온도 77 K까지 일정하게 유지함을 보여 주었으며 아마도 0 K까지 변하지 않을 저항 값으로 예상된다.  $T_c$  이하에서 이러한  $R_{\text{residual}}$  값의 존재는 초전도체 YBCO 박막과 균일하게 증착된 금속체인 GMR-SV 다층박막 저항과 사이에 발생할 수 있는 공간적 틈을 형성한 틈 층(gap layer, G layer)의 저항이 합성되어 나타난 것으로 볼 수 있다[7]. 이러한 잔류 내부저항의 존재로 인해 4-단자 탐침법으로 특이한 자기저항 곡선을 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 하이브리드 형태의 HTS와 GMR-SV 다층박막 구조인  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiFe}(25 \text{ nm})/\text{CoFe}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.5$



**Fig. 4.** SEM image having a surface morphology of the top surface for the hybrid structure of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiFe}(25 \text{ nm})/\text{CoFe}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.5 \text{ nm})/\text{CoFe}(7 \text{ nm})/\text{IrMn}(10 \text{ nm})/\text{Ta}(5.5 \text{ nm})$  film. The size of grain with boundary is about 1~2  $\mu\text{m}$ .

nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) 다층박막의 상부 표면층에 대한 표면형상 구조를 나타낸 SEM의 영상이다. 기판 온도 650 °C 이상에서 증착되어 산소분위기에서 열처리를 거친 두께 300 nm의 HTS YBCO 박막 위에 상온에서 두께 55 nm의 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 다층구조를 갖는 박막을 IBD법으로 적층한 시료는 YBCO 박막의 표면형상구조 그대로 반영할 것으로 보인다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 YBCO 박막의 낱알 경계(grain boundary)의 모양이 보이고 낱알(grain)의 크기는 대략 1~2  $\mu\text{m}$ 의 크기를 보이고 있다. Fig. 4의 SEM 영상에서 보이는 0.5  $\mu\text{m}$ 의 크기 흰색 모양은 HTS 박막에서 형성된 판상형(planner type) 돌출부(outgrowth)이다[12]. 그러므로 Fig. 3에서 나타낸 R-T 곡선에서 YBCO



**Fig. 5.** (Color online) (a) The schematic of hybrid structure composed of HTS YBCO film and IrMn based GMR-SV multilayer. SEM images having a surface morphology of (b) and (c) the side cross section for the sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/YBCO(300 nm)/NiFe(25 nm)/CoFe(5 nm)/Cu(2.5 nm)/CoFe(7 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5.5 nm) film included of the gap (G) layer. The SEM image of (c) was magnified the dash red color rectangular in one of (b). The thickness of the existed G layer noticed in (c) is about 9.53 nm.

박막의 잔류저항의 존재가 YBCO 박막 자체의 나쁜 입자 경계에서 발생할 수 있는 저항 때문이 아니라는 것을 나타낸다.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 300 nm 두께의 YBCO 박막에 적층한 55 nm 두께의 NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층박막 시료에 대한 구조를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 동시 열증착법으로 제작한 YBCO 박막과 이온빔 증착법으로 제작한 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막 구조이다. 박막시료의 단면 형상구조를 나타내는 Fig. 5(b)와 빨간 점선 부근을 확대한 Fig. 5(c)는 각각 150,000 배율과 500,000 배율로 관찰한 SEM 영상으로서, Fig. 5(c)에서 약 9.54 nm 두께의 G 층이 확연하게 나타나 있음을 볼 수 있다. 이러한 G 층은 YBCO 박막 표면이 공기 중에 노출되어 만들어진 자연 산화층이다. SEM 단면 영상에서 확인된 절연층으로 여겨지는 G 층은 고온초전도체인 YBCO 박막이 77 K에서 저항이 0이 되므로, GMR-SV 다층박막의 표면저항에 더하여  $R_{(residual)} = 0.465 \Omega$ 로 나타내게

된다. 이러한 현상으로 인하여 초전도 특성과 GMR-SV 다층박막의 전류의 흐름이 스핀밸브 층에서 강자성체들 간의 스핀 배열의 평행과 반평행에 따른 전류 흐름 경로에서 발생하는 전류전달효과(current transfer effect, CTE)의 특성을 일으키는 가장 중요한 요인이 될 것이다.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 증착된 YBCO(300 nm) 박막 위에 Fig. 5(a)에서 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 상온에서 측정된 major MR 곡선을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 자기저항비 MR(%), 반강자성체 IrMn과 인접한 강자성체 CoFe 고정층간의 교환결합세기( $H_{ex}$ )와 보자력( $H_c$ ) 값들은 5.5%,  $H_{ex} = 235$  Oe, 그리고  $H_c = 40$  Oe 임을 보였다. Fig. 6(b)는 상온에서 4-단자법으로 측정된 MR 곡선에서 센싱전류의 변화에 대한 센싱전압 및 MR(%)의 특성을 보여준다. 측정된 센싱전압은 인가한 전류와 완전하게 선형적으로 증가

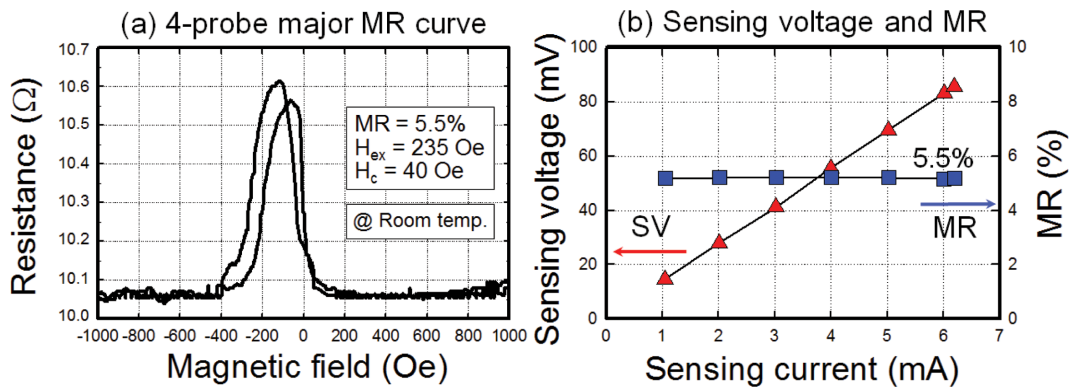


Fig. 6. (Color online) (a) The major MR curve and (b) the sensing voltage versus sensing current on the same interval distance between two electrodes of in the 4-probe method measured at room temperature.

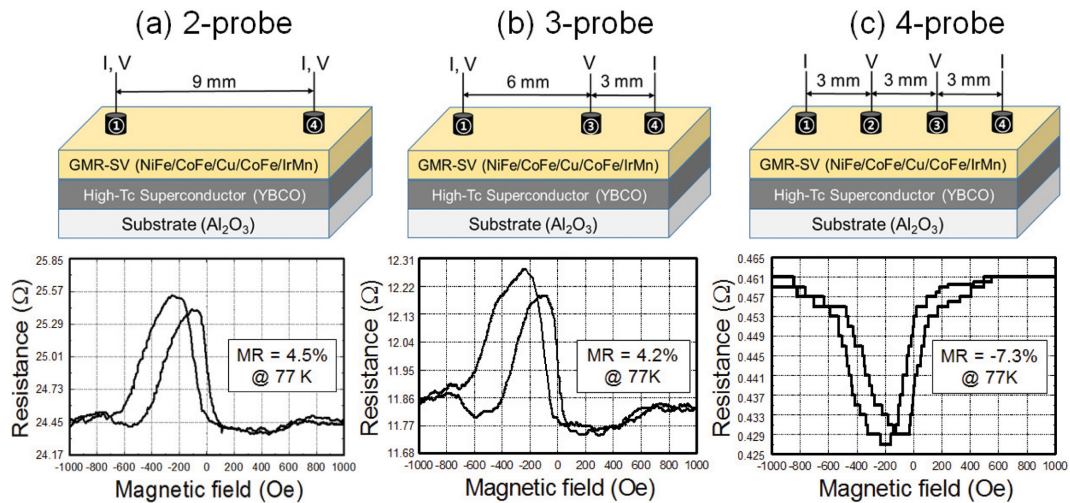
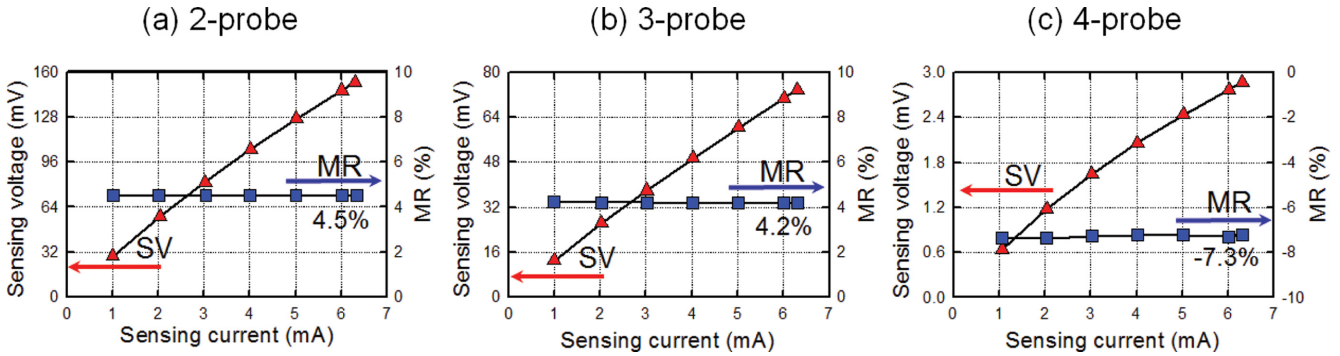


Fig. 7. (Color online) The major MR curves depending on the distance between ① and ② contacts using by (a) 2-probe, (b) 3-probe, and (c) 4-probe method measurements at 77 K of liquid nitrogen temperature.



**Fig. 8.** (Color online) Linear I-V curves of sensing voltage (mV) and positive MR (%) as a function of the sensing current obtained using (a) 2-probe and (b) 3-probe method. (c) Nonlinear I-V curve of sensing voltage and inverse MR as a function of the sensing current obtained using 4-probe method. The inverse MR caused by the different current paths in the spin valve effect of the hybrid-type structure consisting of a superconductor and GMR-SV, with two states of  $R_{\uparrow\uparrow(\text{Low})}$  and  $R_{\uparrow\downarrow(\text{High})}$  dependin on the spin array configuration of two ferromagnetic layers.

했다. 하이브리드 형태 YBCO/GMR-SV 샘플의 MR(%)은 약 5.5%으로 거의 일정했다. 즉, 하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막 구조에서 GMR-SV 박막으로 인해 전류가 1.0 mA에서 6.3 mA로 증가함에 따라 MR(%)은 영향을 받지 않았다. 전압 및 전류 패드가 잘 분리되어 있으면 영향을 받지 않는 HTS 특성으로 인해 I-V 곡선이 항상 선형 특성을 보였다.

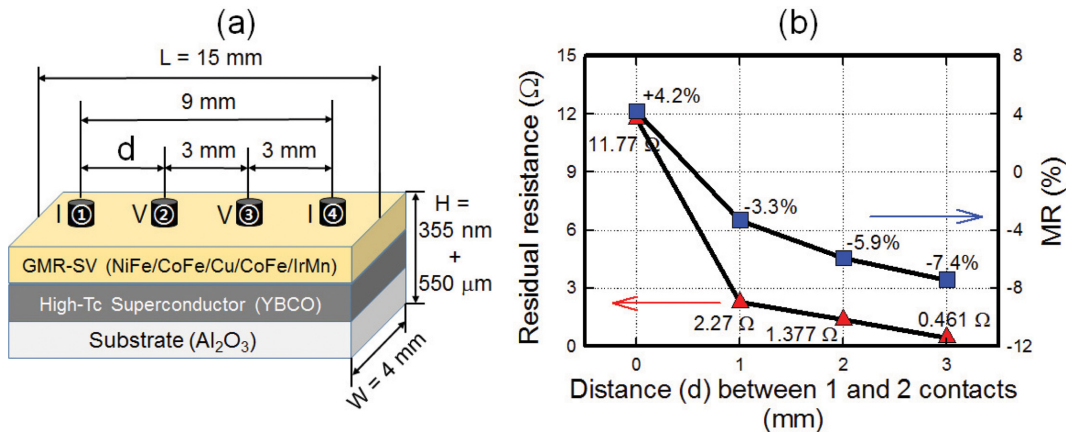
Fig. 7(a)는  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiFe}(25 \text{ nm})/\text{CoFe}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.5 \text{ nm})/\text{CoFe}(7 \text{ nm})/\text{IrMn}(10 \text{ nm})/\text{Ta}(5.5 \text{ nm})$  다층박막 시료에 대한 2-단자 전극모양처럼 센싱전류와 센싱전압을 동일한 접촉부로 설정하여 77 K에서 측정된 major MR 곡선이다. 9 mm 거리로 분리된 2-단자로 측정하여 얻은 MR 곡선으로부터 MR(%),  $H_{\text{ex}}$ , 그리고  $H_c$  값들은 각각 4.5%,  $H_{\text{ex}} = 400 \text{ Oe}$ , 그리고  $H_c = 90 \text{ Oe}$  임을 보였다. 또한 Fig. 7(b)는  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiFe}(25 \text{ nm})/\text{CoFe}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.5 \text{ nm})/\text{CoFe}(7 \text{ nm})/\text{IrMn}(10 \text{ nm})/\text{Ta}(5.5 \text{ nm})$  다층박막 시료에 대한 3-단자 전극모양처럼 센싱전류와 센싱전압을 동일한 접촉부로 설정하여 77 K에서 측정된 major MR 곡선이다. 6 mm와 3 mm 거리로 분리된 3-단자로 측정하여 얻은 MR 곡선으로부터 MR(%),  $H_{\text{ex}}$ , 그리고  $H_c$  값들은 각각 4.2%,  $H_{\text{ex}} = 400 \text{ Oe}$ , 그리고  $H_c = 100 \text{ Oe}$  임을 보였다.

한편, Fig. 7(c)는  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiFe}(25 \text{ nm})/\text{CoFe}(5 \text{ nm})/\text{Cu}(2.5 \text{ nm})/\text{CoFe}(7 \text{ nm})/\text{IrMn}(10 \text{ nm})/\text{Ta}(5.5 \text{ nm})$  다층박막 시료에 대한 3 mm의 등 간격으로 분리된 4-단자 전극모양처럼 센싱전류와 센싱전압을 각기 다른 접촉부로 설정하여 77 K에서 측정된 major MR 곡선이다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(c)에서 보여준 상온과 77 K의 온도가 다른 두 개의 자기저항곡선들을 비교하여 볼 때, MR(%),  $H_{\text{ex}}$ , 그리고  $H_c$  값들은 상온에서 5.5%,  $H_{\text{ex}} = 235 \text{ Oe}$ , 그리고  $H_c = 40 \text{ Oe}$  이지만 77 K에서  $\text{MR} = -7.3\%$ ,  $H_{\text{ex}} = 400 \text{ Oe}$ , 그리고  $H_c = 50 \text{ Oe}$  로 모두 크게 항상 뒤를 보였다. 여기서 MR(%)은 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. 특히 Fig. 7(c)에서 MR 값이 계단형으로 나타난 이유는, Fig. 3의 R-T 곡선에서 비록 초전도체 YBCO 임계온도 이하인 77 K에서 완전한 0의 저항값이 아닌 GMR-SV 박막의 매우 낮은 내부 저항 값인  $0.461 \Omega$ 의 존재 때문인 것으로 보여 진다.

Fig. 8(a)는 77 K에서 2-단자법으로 측정된 MR 곡선에서 센싱전류의 변화에 대한 센싱전압 및 MR(%)의 특성을 보여 준다. 측정된 센싱전압은 인가한 전류와 거의 선형적으로 증가했다. 하이브리드 형태 YBCO/GMR-SV 샘플의 MR(%)은 약 4.5%으로 거의 일정했다. 즉, 하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막 구조에서 GMR-SV 박막으로 인해 전류가 1.0 mA에서 6.3 mA로 증가함에 따라 MR(%)은 영향을 받지 않았다. 센싱전류와 센싱전압 패드가 같은 위치에 있으면, 비록 HTS YBCO 박막의 저항이 0 이지만 GMR-SV 박막으로만 전류전달효과(current transfer effect, CTE)로 인해 I-V 곡선이 항상 선형 특성을 보였다[13,14]. Fig. 8(b)는 77 K에서 3-단자법으로 측정된 MR 곡선에서 센싱전류의 변화에 대한 센싱전압 및 MR(%)의 특성을 보여준다. 측정된 센싱전압은 인가한 전류와 2-단자법으로 측정된 I-V 곡선의 결과와 같이 거의 선형적으로 증가했다. 하이브리드 형태 YBCO/GMR-SV 샘플의 MR(%)은 약 4.2%으로 거의 일정했다. 또한 하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막 구조에서 GMR-SV 박막으로 인해 센싱전류가 1.0 mA에서 6.3 mA로 증가함에 따라 MR(%)은 영향을 받지 않았다. 입력 센싱전류 단자 ①와 출력 센싱전압 단자 ②이 같은 위치에 붙어있으면, 비록 HTS YBCO 박막층의 저항이 0 이지만 GMR-SV 박막으로만 흐르는 CTE로 인해 I-V 곡선이 항상 선형 특성을 보였다.

Fig. 8(c)는 77 K에서 4-단자법으로 측정된 MR 곡선에서 센싱전류의 변화에 대한 센싱전압의 특성을 나타낸 I-V 곡선



**Fig. 9.** (Color online) (a) The dimension of our hybrid type sample and (b) the change in residual resistance and positive and inverse MR (%) values depending on the distance between ① and ② contacts.

및 MR(%)의 특성을 보여준다. 측정된 센싱전압은 인가한 전류와 2-단자와 3-단자법으로 측정된 I-V 곡선의 결과와 달리 완전하게 비선형적으로 나타났다. 하이브리드 형태 YBCO/GMR-SV 샘플의 반전된 MR(%)은 약 -7.3%로 센싱전류가 1.0 mA에서 6.3 mA로 증가함에 따라 변화하지 않았다. 입력 센싱전류 단자 ①와 출력 센싱전압 단자 ②이 충분히 떨어진 다른 위치에 있으면, HTS YBCO 박막층의 저항이 0 일 때 나타난 잔류저항이 GMR-SV 박막과 G 층의 합성저항으로 존재하게 된다. 반전된 음의 MR(%) 값은 하이브리드 형태에서 발생하는 CET로 인해 I-V 곡선이 항상 비선형 특성이 이러한 특이한 현상을 뒷받침 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9(a)에서 나타난 4-단자법에서 전류단자 및 전압단자의 접점이 잘 분리되지 않은 경우, G 층이 없는 일반 금속 및 초전도체 하이브리드에서 발생하는 전류전달효과는 단자 ①로 공급된 센싱전류가 단자 ④에 나타나기 전에 HTS YBCO가 완전히 초전도 상태인 77 K에서 YBCO 층을 통해 흐르게 된다. 이 경우에는 잔류저항이 없어야 한다. 그러나 접촉부 단자 ①과 단자 ② 사이의 간격이 너무 크지 않으면 모든 전류가 단자 ② 위치에서 YBCO 박막으로 완전히 침투할 수 없기 때문에 저항이 나타날 수 있다. 따라서 77 K에서의 잔여 저항이 있는 잔류저항  $R_{(residual)}$ 은 Fig. 5에서 보인 G 층의 저항  $R_G$ 와 GMR-SV 박막의 저항  $R_{SG}$ 의 조합이 나타난다. Fig. 8(c)에서 보인 비선형 I-V 곡선은 잔류저항  $R_{(residual)}$ 으로 인한 전류전달 효과로 인한 또 다른 증거인 것으로 보인다. 다른 예로서, 내부 초전도 선인 필라멘트(filament)와 외부 Cu 보호층으로 구성된 초전도 상태에서 초전도 선의 I-V 곡선을 측정하면 Fig. 8(c)의 시료에 대한 비슷한 비선형 곡선 형태가 된다[15]. 따라서 4-단자법에서 초전도 YBCO 박막을 바닥층으로 한 하이브리드 박막은 센싱전류 단자 및 센싱전압 단자가 잘 분리되어 있으면 I-V 곡

선은 항상 비선형이다.

확실한 전류전달효과로 인한 반전된 MR(%)가 나타나는 특성을 규명 연구의 좋은 결과를 얻기 위해 잘 분리 된 패드에 서로 동일한 실험을 반복함으로써 전류전달효과가 올바르게 확인하였다. Fig. 9(a)와 9(b)는 하이브리드형 샘플의 치수와 단자 ①과 단자 ② 접점 사이의 거리 (d)에 따른 잔류저항과 역 MR(%) 값의 변화를 각각 보여준 결과이다. 단자 ①과 단자 ②의 접점 2개를 점점 가까이 하여 연결하면 3-단자 측정법으로 얻은 결과와 같은 현상으로 d가 3 mm, 2 mm, 1 mm, 0일 때 잔류저항이 각각 0.461 Ω, 1.377 Ω, 2.27 Ω 그리고 11.77 Ω으로 수십 배 증가하며, MR(%)도 -7.4%, -5.9%, -3.3%, +4.2%인 양의 값으로 변하여 정상적인 형태의 MR 곡선이 나타난다.

Fig. 5에서 보인 G 층의 두께 9.5 nm로 인한 저항이 너무 크기 때문에, 우리는 완전한 전류전달효과를 관찰하기 위해 향후 연구에서 새로운 샘플 제조 공정을 적용 할 것이다. YBCO 박막은 표면처리에 의한 갭 형성을 제거하기 위해 전자 사이클로트론 공명(electron cyclotron resonance, ECR) Ar 이온 밀링시스템으로 건식 에칭하여 자연산화된 G 층을 제거할 수 있다[16]. YBCO 박막 표면에 형성된 G 층인 산화층의 두께를 제어하면서 표면을 처리한 후 GMR-SV 다층 박막을 증착한다. 이러한 새로운 방법으로 제조된 하이브리드 초전도체 및 GMR-SV 다층구조는 강자성에 대한 초전도 및 스핀 전류전달효과를 연구한 결과를 발표 할 것이다.

#### IV. 결 론

YBCO 박막 위에 제작 된 GMR-SV로 구성된 하이브리드 다층구조 박막을 R-T 및 MR 곡선을 2-단자, 3-단자, 그리고 4-단자법으로 측정하였다. 하이브리드 YBCO/GMR-SV 구조

는  $T_c$ 보다 낮은 온도인 77 K에서 0.461  $\Omega$  내부저항인 잔류 저항  $R_{(residual)}$ 을 가졌다. 하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막이 갖는 내부 및 잔류저항은 센싱전류가 1.0 mA에서 6.3 mA 까지 증가에 따라 비선형적으로 변화되었지만, 전류 증가는 YBCO의 임계 전류 미만의 값에서 초전도에 영향을 주지 않았다. 77 K에서 측정된 반전된 MR 곡선으로부터 자기 저항비는 -7.4 %이었다. 음의 값 MR(%)은 상부층의 스핀밸브 효과에서 전류의 경로가 다르기 때문에 GMR-SV 다층구조와 YBCO 박막 사이에 G 층이 존재했기 때문이며, 이를 시료의 단면을 관찰한 SEM 영상으로 확인하였다. YBCO 층과 GMR-SV 층 사이의 G 층은 하이브리드 다층구조의 제조 중에 형성된 큰 저항을 갖고 있었다. 하이브리드 YBCO/GMR-SV 다층박막에서 G 층 존재로 인해 GMR-SV 구조는 스핀 배열에 따라 낮은 저항  $R_{\downarrow\downarrow}(low)$ 과 높은 저항  $R_{\uparrow\downarrow}(high)$ 의 두 가지 상태를 가졌지만 YBCO 박막의 저항은 0 임으로 발생하는 전류전달효과로 4단자 사이의 거리에 의존하는 I-V 곡선과 잔류저항, 그리고 MR(%)을 변화가 뚜렷이 나타났다. 고온초전도 YBCO 박막의 임계온도  $T_c$  아래에서 측정된 음의 MR(%) 현상은 G 층의 저항에서의 전류가 박막 면내 터널링하는 전류전달효과로 설명되었다.

### 감사의 글

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

### References

[1] D. Stamopoulos, E. Aristomenopoulou, and A. Lagogiannis,

Supercond. Sci. Technol. **28**, 79501 (2015).  
 [2] Y. Zhu, A. Pal, M. G. Blamire, and Z. H. Barber, Nat. Mater. **16**, 195 (2017).  
 [3] J. Zhu, X. Cheng, C. Boone, and I. N. Krivoroto, Phys. Rev. Lett. **103**, 27004 (2009).  
 [4] S. S. Lee, J. R. Rhee, D. G. Hwang, and K. Rhie, J. Magn. **6**, 83 (2001).  
 [5] S. W. Han, J. Korean Magn. Soc. **22**, 66 (2012).  
 [6] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, New Physics: Sae Mulli **67**, 1035 (2017).  
 [7] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **28**, 32 (2018).  
 [8] H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper, J. Vac. Sci. Tech. **21**, 725 (1982).  
 [9] 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).  
 [10] S. R. Foltyn, L. Civale, J. L. MacManus-Driscoll, Q. X. Jia, B. Maiorov, H. Wang, and M. Maley, Nat. Mater. **6**, 631 (2007).  
 [11] 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).  
 [12] X. K. Wang, D. X. Li, D. Q. Li, Y. P. Lu, S. N. Song, Y. H. Shen, J. Q. Zheng, R. P. H. Chang, J. B. Ketterson, J. M. Chabala, D. Hansley, and R. Levi-Setti, J. Appl. Phys. **67**, 4217 (1990).  
 [13] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, J. Electron. Mater. **47**, In Printed (2018).  
 [14] O. P. Lednyov and V. A. Frolov, Problems of Atomic Science and Technology (VANT), Series Nuclear Physics Research: Theory and Experiment **7**, 15 (1989).  
 [15] V. Solovyov and P. Farrell, Supercond. Sci. Technol. **30**, 14006 (2017).  
 [16] W. H. Lee, D.G. Hwang, S. S. Lee, and J. R. Rhee, J. Korean Magn. Soc. **25**, 149 (2015).