

Negative Magnetoresistance Ratio Characteristics of NiO/NiFe/Cu/NiFe Multilayer and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Film by Current Transfer Effect

Purevdorj Khajidmaa

Department of Oriental-Western Biomedical Engineering, Graduation, Sangji University, Wonju 26339, Korea

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

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

Woo-Il Yang

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

(Received 21 March 2019, Received in final form 14 April 2019, Accepted 16 April 2019)

The magnetoresistance (MR) curves of giant magnetoresistive-spin valve (GMR-SV) multilayer on Corning glass and sapphire/high-temperature superconductor (HTS) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) film fabricated by magnetron sputtering were compared and analyzed. Hybrid type HTS and GMR-SV multilayer film with antiferromagnetic NiO thickness of 10 nm has a negative MR ratio of -7.7% , an exchange coupling field (H_{ex}) of 120 Oe, a coercive force (H_c) of 125 Oe, respectively. However, there is exist a positive MR ratio of $+7.3\%$ in case of NiO thickness of 60 nm. The glass/NiO/NiFe/Cu/NiFe/Ta multilayer showed linear current-voltage (I-V) curve, but the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}/\text{NiO}(10\text{ nm}, 60\text{ nm})/\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{NiFe}/\text{Ta}$ multilayer showed a nonlinear I-V curve in which the resistance value of $1.15\ \Omega$ and $59.4\ \Omega$ decreased to $1.02\ \Omega$ and $50.2\ \Omega$ when the current of 15.7 mA increased to 1.67 mA, respectively. This results are explained by the current transfer effect in the 4-probe electrode measurement method occurred when the resistance of the YBCO film is 0.

Keywords : NiO, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), gap layer, current-voltage (I-V) curve, nonlinear, 4-probe electrode

NiFe/Cu/NiFe 박막과 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막 사이 NiO 층의 두께에 따른 전류전달효과에 의한 음의 자기저항비 특성 연구

카지드마

상지대학교 일반대학원 동서의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

강병욱 · 최종구 · 이상석*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

양우일

상지대학교 응용물리전자학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

(2019년 3월 21일 받음, 2019년 4월 14일 최종수정본 받음, 2019년 4월 16일 게재확정)

코닝유리와 사파이어/ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 박막 위에 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve, GMR-SV) 다층박막을 마그네트론 스퍼터링법으로 제작한 후 시료를 상온과 액체질소 상의 온도 77 K에서 측정한 자기저항(magnetoresistance, MR) 곡선으로부터 그 특성을 비교 분석하였다. 하이브리드형 고온초전도체 박막과 GMR-SV 다층박막은 NiO의 두께가 10 nm

일 때 77 K에서 측정된 MR 곡선으로부터 얻은 음의 MR 비, 교환결합세기(H_{ex}), 보자력(H_c)는 각각 -7.7% , 120 Oe, 125 Oe 이었다. 그러나 NiO의 두께가 60 nm 일 때, MR 비는 $+7.3\%$ 이었다. glass/NiO/NiFe/Cu/NiFe/Ta 다층박막은 선형적인 전류-전압(I-V) 곡선을 보여주고 있으며 틈층의 반강자성체인 NiO 두께가 10 nm, 60 nm인 $Al_2O_3/YBCO/NiO/NiFe/Cu/NiFe/Ta$ 다층박막은 77 K에서 전류값이 1.67 mA 일 때 저항값은 각각 1.15 Ω 와 59.4 Ω 에서, 전류값이 15.7 mA 일 때 저항값은 각각 1.02 Ω 와 50.2 Ω 로 감소하는 비선형 특성을 보였다. 4단자 측정법으로 얻은 반전된 MR 곡선과 비선형 I-V 곡선은 YBCO 박막의 저항값이 0 일 때 전류전달효과가 이루어지는 현상으로 설명하였다.

주제어 : NiO, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO), 틈층, 전류-전압(I-V) 곡선, 비선형, 4-단자

I. 서 론

최근에 수소 금속 화합물에서 상온초전도체에 가까운 260 K의 초전도 현상이 발견되며 그 어느 때보다 고온초전도체(high- T_c superconductor; HTS)와 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance-spin valve; GMR-SV)의 이중구조를 갖는 하이브리드(hybrid) 형태의 다층박막 구조에 대한 기초 및 응용 연구의 필요성이 대두되고 있다[1,2] 고온초전도체 특성을 갖는 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막이 임계온도 이하인 액체질소 상의 온도 77 K에서 완전하게 제로인 저항값으로 하여금 나타날 수 있는 초거대자기저항 현상뿐만 아니라[3], 완전반자성체로서 초전도체의 특성과 강자성체의 자기 스핀배열 효과로 하여금 특이하고 획기적인 결과가 예상되므로 이에 대한 기초연구가 필요하다[4,5]. 하이브리드형 다층박막은 Nb 박막 또는 YBCO 박막으로 초전도체의 특성과 GMR-SV 다층박막의 스핀 또는 전류밸브 효과로 하여금 양(+),의 자기저항(magnetoresistance, MR) 비에 따라 이의 값이 반전되어 음(-)의 값으로 MR 비의 특성이 나타난다[4,5]. 이러한 반전된 MR비의 특성은 YBCO 박막의 초전도 현상과 GMR-SV 하이브리드 다층박막 구조에서 약 10 nm 정도 두께의 틈층(gap layer, GL)으로 부도체층 사이를 두고 외부 자계에 따른 스핀배열 구조로 일어나는 격차 때문에 생기는 면상 전류터널링 현상이 바로 전류전달효과임을 보고하였다[5-9].

본 연구에서는 액체질소(liquid nitrogen, LN₂) 상의 온도보다 높은 임계온도(critical temperature, T_c)를 갖는 초전체인 YBCO 박막 위에 반강자성체인 NiO 계 GMR-SV 박막을 적용한 하이브리드형 다층구조를 시료로 사용하였다. 상온에서 77 K까지 변할 때, 저항에 따라 변화되는 온도 의존성에 대해 조사하고 상온과 77 K에서 4-단자(probe) 방법을 사용하여 얻은 MR 곡선과 전류-전압(I-V) 곡선을 각각 측정하여 얻은 자기저항 특성을 비교 분석하였다. 또한 측정된 MR 곡선을 분석하여 HTS와 GMR-SV 박막을 통과하는 전류전달의 특성을 논의하였다.

II. 실험 방법

코닝유리(Corning glass, #7059) 기판과 사파이어(Al_2O_3)

기판에 제조된 300 nm 두께의 고온초전도체 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막 위에 NiO(AFM layer)/NiFe(고정층, pinned FM layer)/Cu(spacer)/NiFe(자유층, freed FM layer)/Ta(top) 다층구조를 기본진공도 3×10^{-6} Torr인 고진공 증착시스템에 구비된 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 방법을 이용하여 상온에서 동시에 제작하였다[10]. 여기서 Y, Ba, Cu 조각을 담아 분리된 3개의 개별 보트(boat)를 가열하여 동시 증착하는 열증착법(thermal evaporation method)으로 제작한 고온초전도체인 YBCO 시료는 두께 0.55 mm, 직경 2인치 크기인 사파이어 기판 위에 300 nm 두께의 박막으로 독일 THEVA(Theva Dünnschichttechnik GmbH, Rote-Kreuz-Str. 8, 85737 Is maning Germany) 회사 제품을 사용하였다[8]. 부도체이자 반도체의 성질을 가지며 반강자성체인 NiO 박막은 고순도 NiO 분말(powder)를 고온에서 소결(sintering)하여 3 mm 두께로 3-인치 직경 크기의 타겟을 rf(13.56 MHz)-스퍼터링하여 제조하였다[10]. NiO 증착시 Ar 가스만을 사용하여 작업진공도(working pressure) 9.0×10^{-4} Torr에서 증착하였다. NiO 박막의 두께는 rf 전력 100 W으로 고정하여 증착율을 1 분당 1 nm로 하고 증착시간을 10 m(분)에서 60 m까지 변화시키면서 적층하였다.

한편 NiO 박막과 in-situ 상태에서 스핀밸브 구조인 NiFe/Cu/NiFe 다층박막을 증착할 때 시편의 일축이방성을 유도하기 위하여 인가된 영구자석의 자기장 세기는 350 Oe이었다. 직경 3인치 크기를 갖는 Ta, NiFe, Cu 타겟들을 사용하여 dc 스퍼터링법으로 박막을 증착할 때 플라즈마의 상호 간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 막기 위하여 분리막을 사용하였다. 각 층의 두께는 스퍼터링 시 타겟 위에 시편이 머무르는 시간과 인가하는 전력으로 조정하였고 시편의 고유저항과 크기 효과를 고려하여 증착되는 모든 박막은 직사각형 기판 또는 금속판 그림자 마스크(shadow mask)로 하여금 동일한 모형을 제작되었다. Ta, NiFe, Cu의 박막에 대한 증착률은 각각 0.1 nm/s, 0.15 nm/s, 0.12 nm/s이었다. 다층박막 구조에서 하부 고정 자성층의 NiFe, 중간층의 Cu, 상부 자유 자성층의 NiFe, 보호층의 Ta은 각각 3 nm, 2 nm, 6 nm, 5 nm의 고정된 두께로 증착하였다.

사파이어 기판 위에 적층한 버퍼층의 YBCO 박막과 NiO 기반 GMR-SV 다층박막 시료는 4-단자 법으로 MR 곡선을

측정하였다. 하이브리드 YBCO/GMR-SV 박막 표면 위에 전극패드를 인듐이나 은풀(silver paste)을 이용하여 4개의 단자를 형성하였다. 박막 시료의 자화용이축 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 박막 시료의 보자력(coercivity; H_c), 교환결합세기(exchange coupling field; H_{ex}), 자기저항비(magnetoresistance ratio; MR 비(%))는 4단자법 자기저항 시스템으로 MR 곡선을 측정하여 각각 얻었다. 또한 상온과 77 K에서 측정하여 I-V 곡선과 반전된 MR 곡선을 얻어 분석하였다.

III. 실험결과 및 토의

코닝유리와 Al_2O_3 기판 위에 300 nm 두께의 YBCO 박막에 적층한 26.0 nm 또는 76.0 nm 두께의 NiO/NiFe/Cu/Ta 다층박막 시료에 대한 구조를 Fig. 1(a)와 1(b)에 각각 나타내었다. 동시 열증착법으로 제작한 YBCO 박막 위에 rf-와 dc-파그네트론 스퍼터링 증착법으로 제작한 NiO 계 GMR-SV 다층박막 상부 표면층에 Fig. 1(a)와 1(b)에서 보여준 바와 같이 등간격으로 4단자법 측정을 위한 전극은 인듐을 사용하여 연결하였다. 본 실험에 사용된 4개의 시료 중 2개의 시료 A와 시료 B는 NiO 두께가 다르게 코닝유리 기판 위에 단순히 적층한 glass/NiO(A = 10 nm, B = 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층구조를 갖는 NiO 계 GMR-SV 박막을 Fig. 1(a)에서 나타내었다. 사용된 4개의 시료 중 나머지 2개인 시료 C와 시료 D는 Al_2O_3 기판과 300 nm 두께의 YBCO 박막 위에 NiO 두께가 다르게 적층한

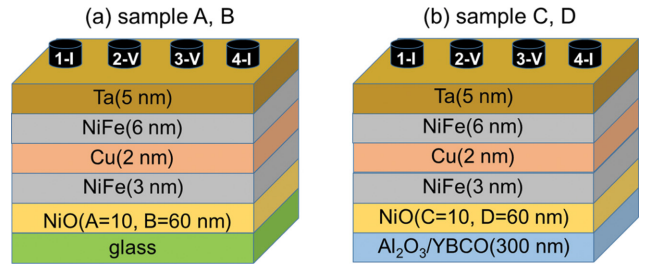


Fig. 1. (Color online) Multilayer structures and 4-probe electrodes of (a) two samples(A, B) with glass/Ta(5 nm)/NiO($t = 10$ nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) and (b) two samples (C, D) with glass/Ta(5 nm)/NiO($t = 10$ nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), respectively.

Al_2O_3 /YBCO(300 nm)/NiO(A = 10 nm, B = 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층구조를 갖는 NiO 계 GMR-SV 박막을 Fig. 1(b)에서 나타내었다. 본 연구팀은 선행연구로 보고한 YBCO/IrMn 계 GMR-SV 하이브리드 다층구조의 반전된 자기저항 특성을 갖는 결과가 인위적으로 산화된 절연층이 생기도록 공기 중에 30일 이상 노출시켜 놓은 것과 달리, 본 연구는 반강자성체인 NiO 절연층이 형성된 후 NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층박막 구조를 형성하였다[5,11].

YBCO 단일박막과 하이브리드 박막 시료를 4단자법으로 상온에서 액체질소 상의 온도(77 K)까지 저항변화를 관찰하였다. 비저항-온도(resistivity-temperature, ρ -T) 곡선으로 Fig. 2(a)에서 살펴본 바와 같이 상온에서 비저항값이 $2.63 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 의 약 1/3.5이 되는 $0.75 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 를 나타낸 온도 92 K에서 비저항값이 급격하게 변화되는 것을 보여주고 있으며 YBCO 박막의 비저항값이 완전히 0이 될 때 T_c 는 88 K 이

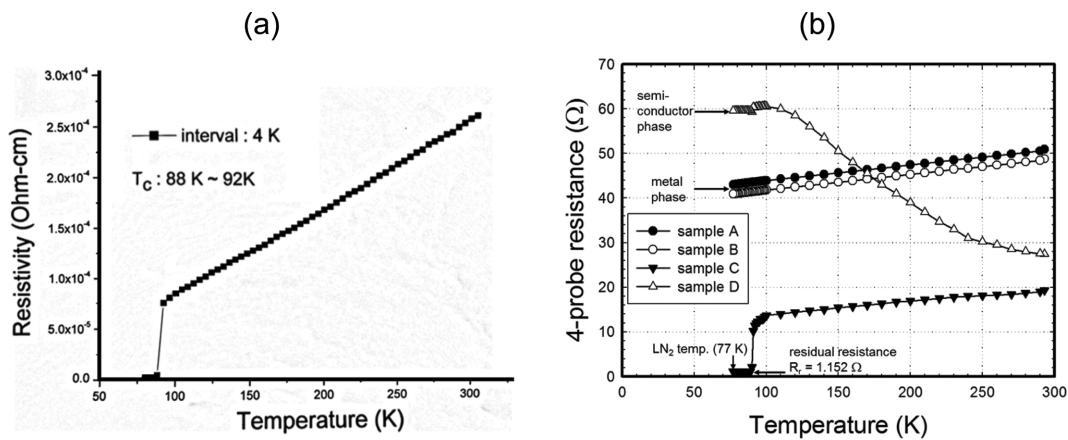


Fig. 2. (a) Resistivity-temperature curve of Al_2O_3 /YBCO(300 nm) film and (b) 4-probe resistance-temperature curves of four samples (A, B, C, and D) with glass/Ta(5 nm)/NiO(A = 10 nm, B = 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) and Al_2O_3 /YBCO(300 nm)/NiO(C = 10 nm, D = 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), respectively. From R-T curves, sample A and sample B show the metal phases, and sample D shows the semiconductor phase. The sample C has a residual resistance of $R_r = 1.152 \Omega$ below the critical temperature (90 K).

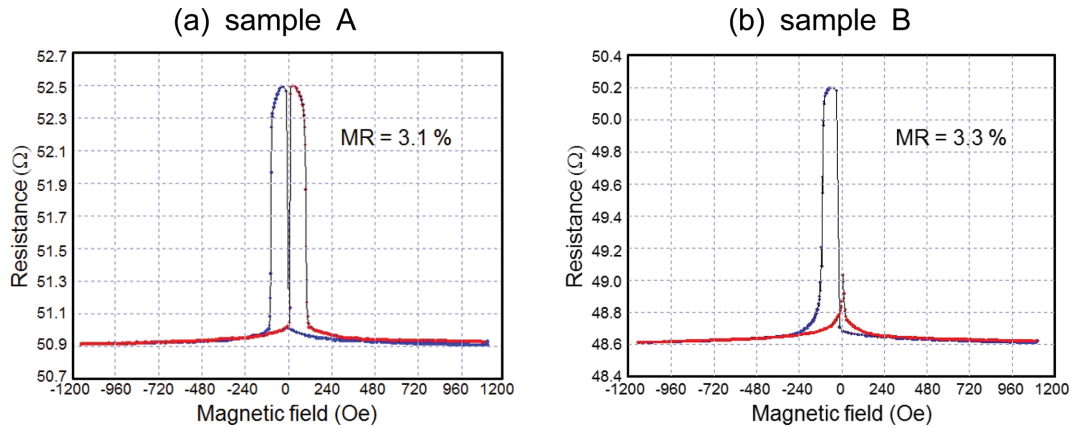


Fig. 3. (Color online) MR curves measured at room temperature for (a) sample A with glass/Ta(5 nm)/NiO(10 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) and (b) sample B of glass/Ta(5 nm)/NiO(60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), respectively.

상임을 보였다. 이 결과로써 사파이어 기판 위에 증착된 300 nm 두께의 YBCO 박막이 $T_c = 88$ K 이하인 액체질소 상의 온도 77 K에서 안정된 초전도체의 특성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 4개 시료에서 하이브리드 형태가 아닌 NiO 계 GMR-SV 다층박막 구조를 갖는 시료 A와 시료 B의 경우에는 4-단자법으로 측정된 저항-온도(resistance-temperature) 곡선들은 Fig. 2(b)에서 전형적인 금속 상(metal phase)의 특성을 갖고 상온에서 77 K까지 36.5 mΩ/K의 비율에서 선형적으로 약 16% 만큼 감소하였다.

고온초전도체인 YBCO 박막과 NiO/NiFe/Cu/NiFe 다층구조로 GMR-SV 하이브리드형 박막구조에서 NiO 두께에 따라 구별된 시료 C와 시료 D의 저항-온도 곡선을 각각 Fig. 2(b)에 보였다. NiO 두께 10 nm인 시료 C의 경우 4-단자에서의 저항값이 상온에서 19.3 Ω으로 92 K 근처에서 저항값은 11.5 Ω으로 7.8 Ω 정도 격차의 값으로 하강하는 온도에 따라 시료 A와 시료 B의 저항-온도 특성과 같이 36.5 mΩ/K 비율로 선형적으로 감소하였다. 90 K에서 저항이 급격히 떨어져 89 K에서 고온초전도체의 임계온도 T_c 와 같은 온도 이하에서 77 K까지 저항값이 완전하게 0으로 떨어지지 않고, 내부 잔류저항(residual resistance, R_r) 값이 1.512 Ω으로 일정하게 유지한 것으로 보였다. 이것은 0 K까지 변하지 않는 값으로 보인다. 고온초전도체의 임계온도 이하에서 이러한 R_r 값의 존재는 초전도체인 YBCO 박막과 균일하게 증착된 금속체인 GMR-SV 다층박막 사이에서 있는 공간을 형성한 틈층(gap layer, G layer)인 반강자성체 NiO 층 저항이 GMR-SV 박막의 저항과 합성되어 나타난 것이다. 이러한 잔류저항의 존재로 인해 4-단자 탐침법으로 특이한 자기저항 곡선을 얻을 수 있음을 본 연구에서 조사하였다[5-8].

한편 GMR-SV 다층구조에서 반강자성체 역할을 하는 틈층인 NiO 두께가 60 nm 시료 D의 경우에는 NiO 두께 10 nm

인 시료 C와 완전하게 다른 저항-온도 특성을 Fig. 2(b)와 같이 나타냈다. 상온에서 액체질소 상의 온도까지 내려가면서 반도체 상의 특성이 나타나며 상온에서 27.3 Ω의 저항값이 비선형적으로 크게 증가하였다. 92 K 근처에서 저항값은 60.5 Ω으로 33.2 Ω 정도 격차의 값으로 상승하다가 90 K에서 NiO 층 아래에 있는 YBCO 층의 초전도 현상으로 하여금 저항값이 59.5 Ω으로 약간 하강하여 큰 잔류저항값을 일정하게 유지하였다. 이러한 결과는 하이브리드형 다층구조에서 틈층의 두께에 크게 의존하고 있는 전류전달효과가 적정한 잔류저항의 값이 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 유리기판 위에 NiO 두께를 각각 10 nm과 60 nm으로 설정하여 적층한 NiO(10 nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm)인 GMR-SV 다층박막에 대해 상온에서 측정된 자기저항곡선이다. NiO 두께가 10 nm인 경우, Fig. 3(a)에서 교환결합세기 H_{ex} 는 0 Oe, 보자력 H_c 은 100 Oe, 자기저항비 MR(%)는 3.1%이었다. 고정자성층 NiFe와 교환결합을 일으키는 반강자성체인 NiO 두께가 얇아서 상온에서 나타나지 않았다. NiO 두께가 60 nm인 경우, Fig. 3(b)에서 H_{ex} 는 48 Oe, H_c 은 50 Oe, MR(%)는 3.3%이었다. 이것은 NiO 두께가 두꺼워지면서 상온에서 나타난 교환결합 특성은 반강자성체인 NiO 두께에 크게 의존함을 보였다[11].

Fig. 4는 Fig. 3에서 보여준 상온에서 측정된 시료 A와 시료 B인 유리기판 위에 NiO 두께를 각각 10 nm, 60 nm으로 설정하여 적층한 NiO(10 nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm)인 GMR-SV 다층박막에 대해 액체질소 온도 77 K에서 측정된 자기저항곡선을 나타냈다. NiO 두께가 10 nm인 경우, Fig. 4(a)에서 H_{ex} 는 200 Oe, H_c 은 205 Oe, 자기저항비 MR(%)는 7.4%로 Fig. 3(a)에서 생기지 않았던 교환결합세기는 크게 나타났다. 반강자성체인 NiO 두께가 얇더라도 고정 자성층 NiFe와 교환결합력이 생겨 전형적인

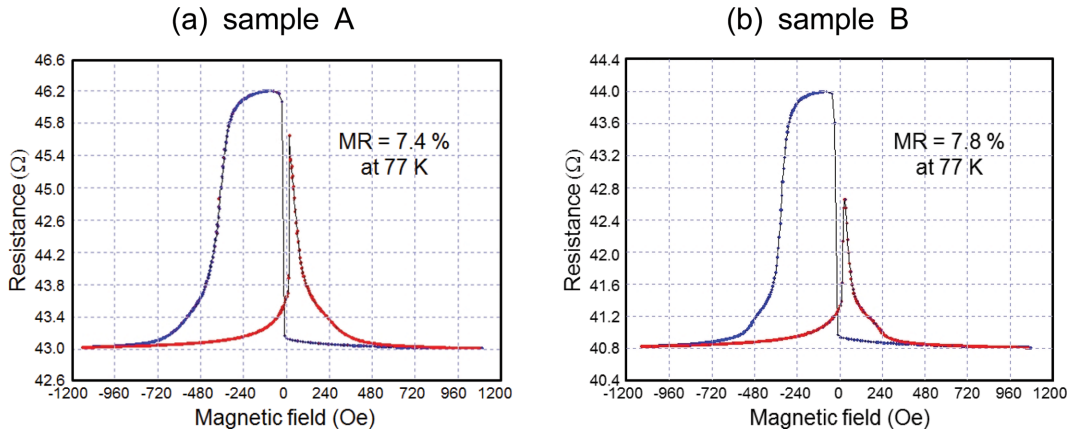


Fig. 4. (Color online) MR curves measured at liquid nitrogen temperature (77 K) for (a) sample A with glass/Ta(5 nm)/NiO(10 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) and (b) sample B of glass/Ta(5 nm)/NiO(60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), respectively.

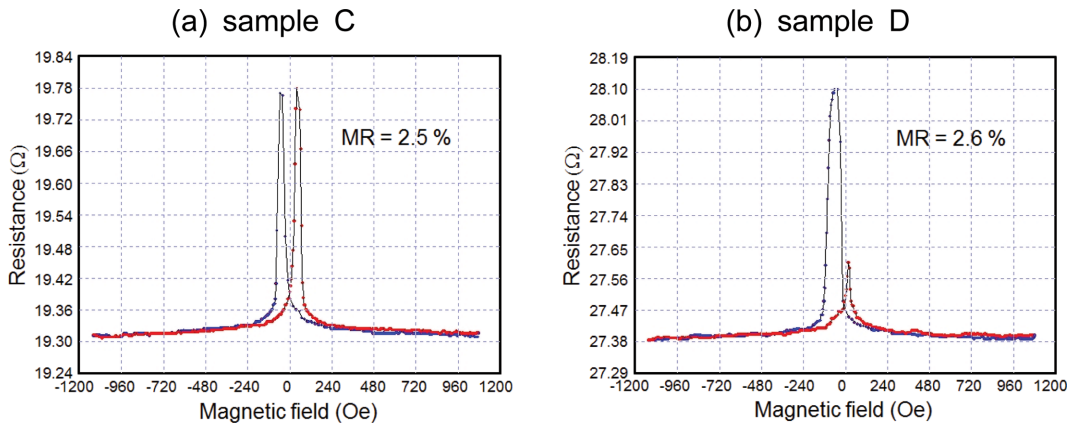


Fig. 5. (Color online) MR curves measured at room temperature for (a) sample C with Al₂O₃/YBCO(300 nm)/NiO(10 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) and (b) sample D of Al₂O₃/YBCO(300 nm)/NiO(60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), respectively.

GMR-SV 특성이 나타난 것은 계면의 교환결합력이 기본적인 최소 두께 10 nm 이상에서는 교환결합세가 포화되어 일정한 값으로 유지함을 보였다. NiO 두께가 60 nm인 경우, Fig. 4(b)에서 H_{ex} 는 190 Oe, H_c 은 200 Oe, MR(%)는 7.8%이었다. 이것은 교환결합력이 NiO 두께에 의존하지 않음을 보여준 것이다.

Fig. 5는 상온에서 측정된 시료 A와 시료 B인 Al₂O₃/YBCO(300 nm) 박막 위에 NiO 두께가 10 nm, 60 nm로 하여 적층한 Al₂O₃/YBCO(300 nm)/NiO(10 nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm)인 하이브리드형 고온초전도체/GMR-SV 다층박막에 대해 상온에서 측정된 자기저항곡선이다. NiO 두께가 10 nm인 하이브리드 박막 시료 C의 경우, Fig. 3(a)에서 보여준 MR 곡선과 달리 약간 수축된 피크형태 MR 곡선로 H_{ex} 는 0 Oe, H_c 은 90 Oe, MR(%)는 YBCO 박막으로 전류가 흐르는 누설효과로 2.5%로 감소하였다. 고정자성층 NiFe와 교환결합을 일으키는 반강자성체인

NiO 두께가 얇아서 상온에서 나타나지 않았다. NiO 두께가 60 nm인 경우인 Fig. 5(b)에서 H_{ex} 는 45 Oe, H_c 은 48 Oe, MR(%)는 2.6%이었다. 이것은 NiO 두께 60 nm로 두꺼워지더라도 YBCO 박막으로 누설된 전류 특성으로 인해 유리기판 위에 증착된 NiO 계 GMR-SV 박막의 MR 특성을 약화시킨 것으로 보인다.

하이브리드형 박막 시료 C와 시료 D를 77 K에서 측정된 MR 곡선들을 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 각각 나타내었다. 두 개의 MR 곡선은 서로 상반된 결과인 반전된 음의 MR 곡선과 비반전된 양의 MR 곡선을 보여 주었다. 먼저 틸트된 NiO 두께가 10 nm 일 때 시료 C를 77 K에서 측정된 Fig. 6(a)에서 MR 곡선으로부터 H_{ex} 는 120 Oe, H_c 은 125 Oe, MR(%)는 음의 MR 비인 -7.7%이었다. 고온초전도체인 YBCO 박막과 자성체 다층박막 사이에 10 nm 두께의 절연층 NiO 박막이 존재함으로 발생한 전류전달효과에 의해 나타난 것이다. 반전된 MR(%)가 나타나는 특성은 4개의 단자가 서

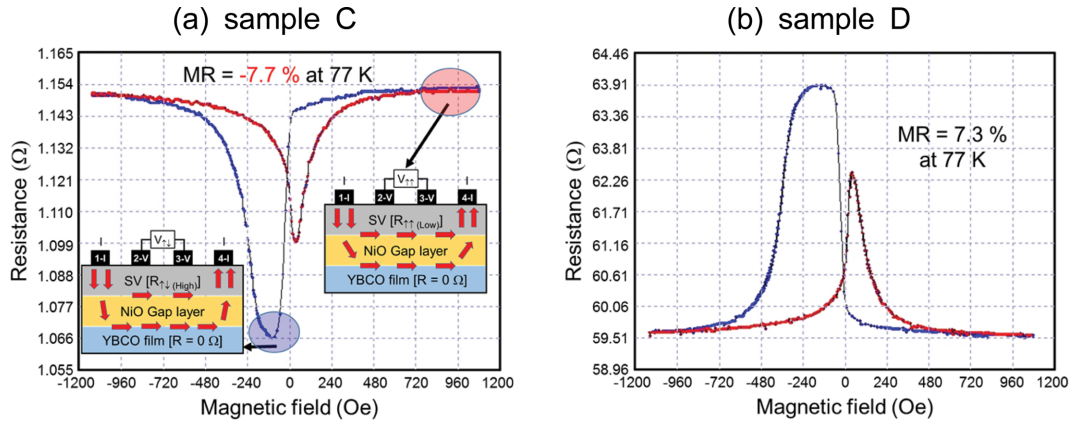


Fig. 6. (Color online) MR curves measured at liquid nitrogen temperature (77 K) for (a) sample C with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiO}(10 \text{ nm})/\text{NiFe}(3 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})/\text{NiFe}(6 \text{ nm})/\text{Ta}(5 \text{ nm})$ and (b) sample D of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YBCO}(300 \text{ nm})/\text{NiO}(60 \text{ nm})/\text{NiFe}(3 \text{ nm})/\text{Cu}(2 \text{ nm})/\text{NiFe}(6 \text{ nm})/\text{Ta}(5 \text{ nm})$, respectively. Two insets of (a) are schematic illustrations for 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 $R_{\uparrow\downarrow}(\text{high})$. The NiO gap layer is the middle resistance layer between the high- T_c superconductor YBCO and GMR-SV layers. The thick arrows indicate the current flows at the interface of the G layer.

로 등간격으로 잘 분리 된 패드에서 두 개 이상의 단자를 접촉하여 2개의 단자나 3개의 단자로 측정할 경우 MR 비는 양의 값으로 변하여 정상적인 형태의 MR 곡선을 보였다.

본 연구진은 이미 면상 터널링 전류(current in plane tunneling; CIPT) 효과인 전류전달효과로 음(-) GMR을 설명할 수 있고 발표하였다[8,12]. 하이브리드 다층박막에서 스핀 밸브 박막의 자화배열이 평행일 때, 금속층인 GMR-SV의 저항이 작아 전류가 금속층을 타고 많이 흐르게 된다. 이 경우 등전위선은 촘촘해져서, 즉 전압이 높게 측정된다. 한편 하이브리드 다층박막에서 스핀밸브 박막의 자화배열이 반평행일 때, 금속층 GMR-SV의 저항이 커지면서 초전도체와 금속면 사이에 위치한 NiO 층을 통해 초전도체로 전류가 흘러 들어가 전도 되는 것이 더 전도가 쉬워지게 된다. 이 경우 많은

전류가 초전도체를 통해 흐르기에 등전위면 사이는 멀어지게 된다. 즉 전압이 낮게 측정된다[8]. Fig. 6(a)에 안에 있는 두 개의 삽입그림들은 전류전달효과에 의해 3개의 층으로 흐르는 전류를 표시하여 반전된 MR의 두 가지 상태를 도시한 것이다. 77 K에서 GMR-SV 다층박막층과 저항이 0인 YBCO 박막층으로 흐르는 전류량의 격차가 발생하게 된다[5]. 즉, GMR-SV의 자성층 스핀배열의 평행상태 $\{R_{\uparrow\uparrow}(\text{low})\}$ 와 반평행상태 $\{R_{\uparrow\downarrow}(\text{high})\}$ 의 격차에 의해 틈층인 NiO 두께가 10 nm로 통과하여 YBCO 박막층으로 전달되는 전류량은 반대로 되어 전체적인 합성저항으로 인해 센싱되는 출력신호는 크게 반전되어 나타난다.

반면에 NiO 두께가 60 nm 일 때 시료 D를 77 K에서 측정한 Fig. 6(b)에서 MR 곡선으로부터 $H_{\text{ex}} = 205 \text{ Oe}$, $H_c =$

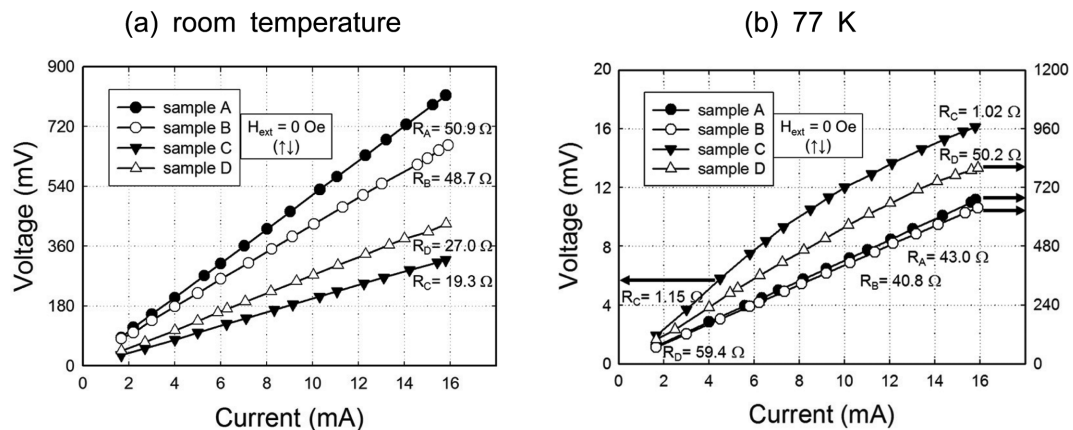


Fig. 7. I-V curves measured at (a) room temperature and (b) liquid nitrogen temperature (77 K) for (a) sample A, B and sample C, D. Here the spin array of magnetization for the measuring I-V curve is anti-parallel state ($\uparrow\downarrow$) at none external magnetic field ($H_{\text{ext}} = 0 \text{ Oe}$).

210 Oe, MR(%)는 양의 자기저항비인 +7.3 %이었다. 고온초전도체 인 YBCO 박막과 자성체 다층박막 사이에 60 nm 두께의 절연층 NiO 박막이 전류전달효과가 생기지 않게 되어 비전된 양의 MR(%)가 나타나는 특성은 4개의 단자가 서로 등간격으로 잘 분리 된 패드에서 두 개 이상의 단자를 접촉하여 2개의 단자나 3개의 단자로 측정할 경우에도 MR 비는 양의 값으로 유지한 정상적인 형태의 MR 곡선을 보였다.

Fig. 7(a)는 시료 A, 시료 B, 시료 C 그리고 시료 D에 대해 상온에서 4-단자법으로 측정한 전류-전압(I-V) 곡선에서 전류의 변화에 대한 전압특성을 보여준다. 여기서 I-V 곡선은 외부자기장(H_{ext})이 0 Oe이며, 스핀밸브의 자화 상태가 반평형일 때 측정된 것이다. 4개 시료 모두가 측정된 전압은 인가한 전류와 완전하게 선형적으로 증가했다. 시료 A, 시료 B, 시료 C 그리고 시료 D의 I-V 곡선에서 선형적인 기울기인 저항값은 각각 50.9 Ω , 48.7 Ω , 19.3 Ω 그리고 27.0 Ω 이었다. 하이브리드 다층박막인 시료 C와 시료 D가 저항이 낮은 값을 가진 것은 YBCO 박막으로 누설효과로 기인된다. 4가지 각 시료에 대해 전류가 16 mA까지 초기 1.67 mA 전류일 때 MR 비는 2.5 %~3.3 %로 일정값으로 유지하였다. 즉, 상온에서 하이브리드 형태의 유무에 관계없이 다층박막 구조에서 GMR-SV 박막의 MR 비는 전류값의 영향을 받지 않았다.

Fig. 7(b)는 시료 A, 시료 B, 시료 C 그리고 시료 D에 대하여 77 K에서 4-단자법으로 측정한 I-V 곡선에서 전류의 변화에 대한 전압특성을 보여준다. 여기서 I-V 곡선은 상온에서와 마찬가지로 외부자기장(H_{ext})이 0 Oe이며, 스핀밸브의 자화 상태가 반평형일 때 77 K에서 측정된 것이다. 하이브리드형이 아닌 순수한 NiO 계 GMR-SV 박막 2개 시료는 상온에서 측정한 I-V 곡선처럼 선형적인 기울기인 43.0 Ω 과 40.8 Ω 의 일정한 값을 보였다. 시료 A, 시료 B와 달리 하이브리드형 다층박막 구조인 시료 C, 시료 D의 77 K에서 측정된 I-V 곡선에서 비선형적 특성을 보이고 있다. 상온에서와 마찬가지로 77 K에서 하이브리드 형태의 유무에 관계없이 다층박막 구조에서 GMR-SV 박막의 MR 비는 7.5 %~7.8 %, -7.7 %로 전류값의 영향을 받지 않았다. 틸층인 NiO 두께가 10 nm인 하이브리드 박막 시료 C의 경우에는 전류값 1.67 mA 일 때 저항값이 1.15 Ω 에서, 전류값이 15.7 mA 일 때 저항값이 1.02 Ω 로 감소하였다. 또한 틸층인 NiO 두께가 60 nm인 하이브리드 박막시료 D의 경우에는 전류값 1.67 mA 일 때 저항값이 59.4 Ω 에서, 전류값이 15.9 mA 일 때 저항값이 50.2 Ω 로 감소하였다. 이것은 4-단자 측정법에서 YBCO 박막으로 전류전달효과가 이루어진 현상이다. 고온초전도체 YBCO 박막층의 저항이 0 일 때, 나타난 잔류저항은 GMR-SV 박막과 G 층의 합성저항으로 존재하게 된다. 반전된 음의 MR 비 값은 하이브리드 형태에서 발생하는 전류전

달효과로 인해 I-V 곡선이 항상 비선형 특성이 이러한 특이한 현상을 뒷받침하고 있음을 알 수 있다.

하이브리드 박막시료 C와 시료 D의 자기저항 특성을 비교하면 상반된 음과 양의 MR 곡선을 나타내고 있다. 이것은 고온초전도체인 YBCO 박막과 GMR-SV 박막 사이 부도체 틸층인 NiO 두께에 의존하여 변화된 것으로 보인다. GMR-SV 박막의 저항과 틸층의 저항값에 따라 전류흐름이 결정되어지는 등가회로의 전류-전압 특성을 연구하여 초거대자기저항비와 초고감도 자장감응도(MS)를 가질 수 있다. 이러한 실험적인 결과는 틸층과 GMR-SV 다층박막 사이 저항의 최적화 조건을 갖도록 박막 제조시 이를 적용하여 새로운 자기정보저장 및 초고감도 바이오 융합소자 개발의 근거로 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

코닝유리 기판과 Al₂O₃(기판)/YBCO 박막 위에 NiO(10 nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층박막을 rf-와 dc-마그네트론 스퍼터링법으로 제작한 4개의 시료를 상온과 액체질소 상의 온도 77 K에서 MR 곡선들을 측정하였다. 하이브리드형 고온초전도체인 YBCO 박막과 GMR-SV 다층박막은 부도체이자 반도체 성질을 갖는 반강자성체인 NiO 박막이 틸층으로써 역할을 하는 두께가 10 nm 일 때, 상온에서는 측정한 MR 곡선으로부터 얻은 MR 비와 H_{ex} , H_c 는 각각 2.5 %와 0 Oe, 90 Oe이었다. 반면에 YBCO 박막이 초전도 특성을 갖는 온도 77 K에서 측정한 MR 곡선으로부터 얻은 음의 MR 비와 H_{ex} , H_c 는 각각 -7.7 %, 120 Oe, 125 Oe이었다. Glass/NiO(10 nm, 60 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층박막은 선형적인 I-V 곡선 보였으나, 하이브리드형 Al₂O₃/YBCO(300 nm)/NiO(10 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층박막은 77 K에서는 전류 1.67 mA 일 때 저항값이 1.15 Ω 에서 전류 15.7 mA 일 때 저항값이 1.02 Ω 로 감소하는 비선형 특성을 보였다. 그러나 NiO 두께가 60 nm 일 때, 양의 MR 비 = +7.3 %를 갖으나 77 K에서 측정한 I-V 곡선은 전류 1.67 mA 일 때 저항값이 59.4 Ω 에서 전류 15.9 mA 일 때 저항값이 50.2 Ω 로 감소하는 비선형 특성을 보였다. 이러한 결과는 하이브리드형 다층박막 구조에서 고온초전도체인 YBCO 박막층의 저항이 0 일 때 4-단자 측정법에서 전류전달효과가 이루어지는 현상에 기인하는 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 기초연구

사업 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2016R1D1A1B03936289)의 결과입니다.

References

- [1] D. Stamopoulos, E. Aristomenopoulou, and A. Lagogiannis, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 79501 (2015).
- [2] B. Li, N. Roschewsky, B. A. Assaf, M. Eich, M. Epstein-Martin, D. Heiman, M. Münzenberg, and J. S. Moodera, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 097001 (2013).
- [3] S. S. Lee, S. J. Oh, D. H. Goo, and D. Youm, *Thin Solid Films* **258**, 299 (1995).
- [4] Y. Zhu, A. Pal, M. G. Blamire, and Z. H. Barber, *Nat. Mater.* **16**, 195 (2017).
- [5] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Electron. Mater.* **48**, 1486 (2019).
- [6] W. I. Yang, B. U. Kang, J. G. Choi, P. Khajidmaa, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 180 (2018).
- [7] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *New Physics: Sae Mulli* **68**, 950 (2018).
- [8] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 32 (2018).
- [9] S. S. Lee, J. R. Rhee, D. G. Hwang, and K. Rhie, *J. Magn.* **6**, 83 (2001).
- [10] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [11] S. S. Lee, D. G. Hwang, K. J. Kim, and K. Rhie, *J. Kor. Phys. Soc.* **40**, 484 (2002).
- [12] D. C. Worledge and P. L. Trouilloud, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 84 (2003).