

Properties of Planar Hall Voltage for the Circular-type GMR-Spin Valve Multilayer Based on IrMn

Jong-Gu Choi and Sang-Suk Lee*

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

(Received 3 February 2020, Received in final form 25 February 2020, Accepted 25 February 2020)

Planar hole resistance (PHR) and planar hole voltage (PHV) characteristics of circular IrMn-based giant magnetoresistance-spin valve (GMR-SV) type Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta multilayer films were investigated. The interlayer exchange coupling field, coercivity, and magnetoresistance ratio of the GMR-SV multilayer were 12.0 Oe, 5.0 Oe, and 5.4%, respectively. The magnetoresistance ratio obtained from the PHR curve was 12.56% and the magnetic sensitivity was 0.63%/Oe. In the PHV curve, the linear slope (sensitive PHV, SPHV) was 120 $\mu\text{V}/\text{Oe}$ due to the voltage difference of 2.4 mV in the external magnetic field ± 12 Oe. As the current value increased from 1.6 mA to 15.0 mA, both PHV and SPHV increased linearly. As a method of improving the sensitivity of the PHR sensor, it is proposed to control the thickness of the Cu layer which can reduce the interchange coupling force in the GMR-SV multilayer.

Keywords : planar hall resistance (PHR) sensor, sensitive planar hall voltage (SPHV), interlayer exchange coupling field, current direction, magnetic easy axis

원 모양 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막에 대한 평면 홀 전압 특성 연구

최종구 · 이상석*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

(2020년 2월 3일 받음, 2020년 2월 25일 최종수정본 받음, 2020년 2월 25일 게재확정)

원 모양 IrMn 기반 GMR-SV형 Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층박막으로 측정된 평면 홀 저항(PHR) 및 평면 홀 전압(PHV)의 특성을 조사하였다. GMR-SV 다층박막의 상호교환결합력, 보자력 및 자기저항비는 각각 12.0 Oe, 5.0 Oe, 5.4% 이었다. 평면 홀 자기저항 곡선에서 얻은 자기저항비가 12.56%이고 자기감응도는 0.63%/Oe 이었다. PHV 곡선에서 외부 자기장 ± 12 Oe 구간에서 2.4 mV의 홀 전압으로 차이를 두며 선형적으로 기울기는 120 $\mu\text{V}/\text{Oe}$ 이었다. 전류값을 1.6 mA에서 15.0 mA까지 증가함에 따라 PHV와 감도(SPHV)는 모두 동일하게 선형적으로 증가하였다. PHR 센서의 감도를 향상시키는 방법의 하나로 GMR-SV 다층박막에서 상호교환결합력을 감소할 수 있는 Cu 층의 두께를 조절하는 것임을 제시하였다.

주제어 : 평면 홀 저항(PHR) 센서, 평면 홀 전압 감도(SPHV), 상호교환결합력, 전류 방향, 자화 용이축

I. 서 론

거대 자기저항(giant magnetoresistance, GMR) 박막이 발견된 이래로 국내외 여러 자성연구 그룹에 의해 나노 테슬라 자기장을 감지하는 자기 센서가 꾸준히 개발되었다[1]. 이미 개발된 GMR-스핀밸브(spin valve, SV) 박막 센서 및 실리콘 홀(Hall) 센서는 나노자성입자나 자성비드를 검출하는

시스템과 맥진파형을 분석하는 의료기기에 각각 활용되고 있다[2,3]. 바이오센서로 활용하는 대표적인 고감도 자기 센서는 거대 자기저항 스핀밸브(GMR-spin valve(SV)) 효과를 이용한 자기저항 센서 이외에도 홀 효과를 이용한 평면 홀 저항(planar hall resistance, PHR) 센서가 있다. 일반적으로 GMR-SV 센서는 전압 측정 방향과 흐르는 전류의 방향이 서로 평행이 되지만 PHR 센서는 이들의 방향이 서로 수직이 된다[1,4]. 두 단자 사이에 흐르는 센싱 전류가 만드는 박막면과 수평으로 통과하는 외부 자기장에 의해 영향 받은 홀 효과에 의해 발생한 전압을 이용하여 자기저항을 측정한다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-33-730-0415,

Fax: +82-33-738-7610, e-mail: sslee@sangji.ac.kr

PHR 센서의 경우 박막의 기본 저항에 관계없이 자기저항 변화만 주어지기 때문에 최대 자기저항비는 무한대가 될 수 있기 때문에 PHR 방식이 GMR 방식보다 센서의 출력 신호와 민감도가 훨씬 큰 장점이 있다[4,5].

PHR 센서는 단순한 미세 패턴으로 만들 수 있으며, 높은 신호 잡음비와 낮은 오프셋 전압의 장점을 갖고 있다[6-8]. 특히 자기 박테리아 및 마이크로 자기비드의 유무 신호를 구별하는 연구결과를 바탕으로 바이오칩(bio-chip)을 개발하는 시도가 보고되었다[9,10]. 국내 자성연구 그룹에서 개발하여 자성비드 검출용으로 사용되는 PHR 센서를 구성하는 자성재료는 IrMn/Cu/NiFe 박막이다. 이러한 삼층박막 구조는 반강자성체 IrMn 층과 자기이방성(anisotropy magnetoresistance, AMR) 효과가 높은 강자성체 NiFe 층 사이에 작용하는 교환 결합력을 비자성체 Cu 층 두께로 조절하여 PHR 센서의 민감도를 향상시키는 특성을 띄고 있다[8-10]. 본 연구팀은 단순형 스핀밸브 구조인 Ta/NiFe/Cu/NiFe/Ta 자성박막으로 원모양 중심에 적교하는 전류 단자와 전압 단자를 형성한 PHR 센서를 제작하여 자기저항의 특성을 조사하였다[11].

IrMn/Cu/NiFe 삼층박막일 경우에는 ± 15 Oe 이내로 교환결합력을 나타내게 하는 Cu 층 두께가 0.2 nm 이내로 매우 작아 고감도 PHR 센서의 특성을 갖는 조건을 찾는 데 어려움이 있다[7]. 반면에 반강자성체로 바이어스된 GMR-SV 다층박막은 고정층과 자유층 사이에 있는 Cu 층은 3 nm 내에서 상호교환결합력을 ± 15 Oe 이내로 조절할 수 있다. 따라서 GMR-SV 박막으로 형성되는 PHR 센서는 감도를 향상시키는데 있어서 조절할 수 있는 Cu 층의 범위가 넓기 때문에 이의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 PHR 센서의 전류 단자와 전압 단자가 서로 직교하는 중심부 패턴을 원모양 형태로 제작한 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막을 이용하

였다. 고감도 PHR 센서로 개발 가능하도록 자장감응도를 향상시켜 생체 내 분자의 식별에 필요한 바이오 자기 센서를 개발하는데 필요한 기초물성을 조사할 목적으로 연구를 수행하였다.

II. 실험 방법

본 연구는 450 μm 두께와 4-인치 직경인 붕소가 도핑된 p-형 Si 웨이퍼 위에 300 nm의 산화층(SiO_2)이 형성된 기판을 사용하였다. Fig. 1(c)와 같이 두께 0.3 mm의 황동판 그림자 마스크(shadow mask)를 사용하여 증착된 박막 시료가 직경 2 mm의 원형 중심에 선폭 200 μm 으로 서로 교차하는 전극을 형성하였다. 선행연구에서 PHR 센서로 적용한 단순 GMR-SV 박막과 달리 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막을 이온빔 증착(ion beam deposition; IBD) 시스템으로 증착 시 기판 위에 그림자 금속 마스크를 350 Oe의 균일한 자기장이 걸리도록 양쪽 원판형 영구자석 사이에 놓고 장착하였다[11].

Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층구조의 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막 시료는 IBD 시스템을 이용하여 상온에서 적층되었다. 이온빔 증착 챔버의 기본 진공도는 4.5×10^{-7} Torr이고, Ar 기체 주입 후 증착 중 진공도는 4.7×10^{-4} Torr를 유지하였다. Ta, NiFe, CoFe, Cu, IrMn 박막들은 해당 타겟을 회전시켜 독립적으로 적층하였다. 박막의 제작과정에서 증착율과 증착 균일도를 결정하는 그리드(grid) 가속 전압, 양극(anode)의 방전 전압, 이온빔(ion beam) 전압 및 전류의 값들은 각각 120 V, 50 V, 870 V, 6.0 mA로 고정하였다. 다층박막 구조로 적층되는 각층 박막들은 챔버 내 기판 홀더와 인접한 위치에 온도 12 $^{\circ}\text{C}$ 를 유지한 냉각수가 흐르는 Cu 관에 고정되어 장착된 수정 발진자(quartz crystal oscillator)

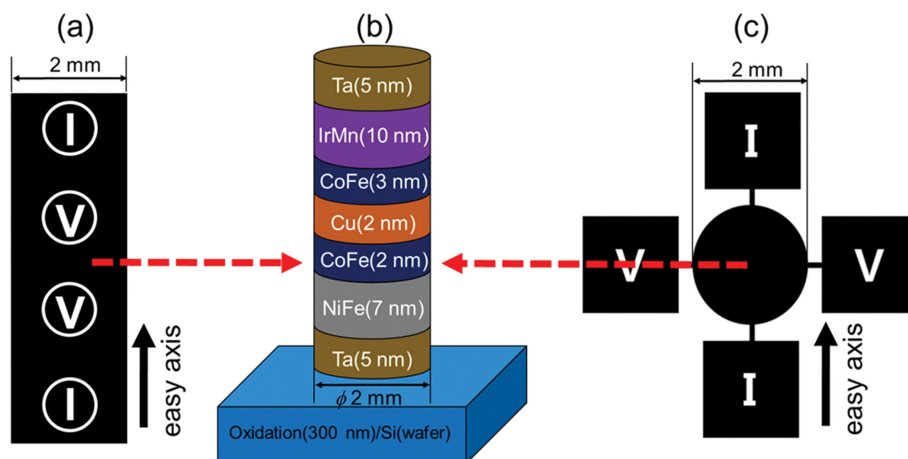


Fig. 1. (Color online) (a) A rectangular patterned sample by using a shadow mask, (b) the schematic of the circle-type spin valve Si(100)/SiO₂(300 nm)/Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)/Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) multilayer structure, and (c) a circular patterned sample with a cross four electrodes by using a shadow mask with the direction of easy axis applied by the uniaxial deposition field.

로 두께가 조절되었다. GMR-SV 다층박막 구조에서 하부 자유층 NiFe/CoFe와 상부 고정층 NiFe 간의 상호결합력이 12 Oe 정도 될 수 있도록 Cu 층의 두께를 2 nm를 선택하였다. 따라서 다층박막은 Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)/Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) 구조로 제작하였다. GMR-SV 다층박막 중 반강자성체 IrMn 층은 1인치 타겟 크기의 클러스터 건(cluster gun) 장착된 dc-마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 시스템으로 제작하였다. 각 타겟의 박막이 증착 시 원소들이 혼재되지 않도록 고진공 챔버 내 3개의 1인치 클러스터 마그네트론 스퍼터링 시스템과 이온빔 증착(ion beam deposition, IBD) 시스템은 서로 독립적으로 분리되어 설치되어 있다[12-14].

제작된 박막 시료의 중심부에서 자화 용이축 방향이 전류 단자 방향과 동일하도록 설정하였다. 자화 용이축 방향이 되는 박막 증착 중 영구자석으로 인가한 일축 자기장 방향이 Fig. 1(a)와 Fig. 1(c)에서 각각 보여준 막대 모양의 일자형 및 원 모양의 십자형 패턴의 전류 방향과 같게 하였다. 증착 후 원형을 중심으로 하여 서로 수직으로 교차하는 형태를 유지하도록 패턴된 GMR-SV 박막 시료의 실제 모습을 Fig. 2(a)의 오른쪽에 나타내었다. 4단자 자기저항 측정 시스템을 이용하여 +600 Oe와 -600 Oe 사이에서 측정된 주 루프(major loop)와 +120 Oe/+60 Oe와 -120 Oe/-60 Oe 사이에서 측정된 소 루프(minor loop)의 자기저항 곡선들을 얻었다. GMR-SV 박막 시료의 산화막 및 표면상 오염으로 인한 자기저항의 특성에 따른 변화를 최소화하기 위해 박막제작 후 챔버 밖으로 꺼내어 바로 인듐(In)을 눌러서 바로 전극을 형성시켰다. 박막 면상의 수평 방향으로 외부 자기장을 인가한 상태에서 4단자법으로 저항을 측정하였다. x-축 방향으로 정한 자화 용이축으로 얻은 자기저항 곡선을 통해 GMR-SV 박막 시료의 자기저항비(magnetoresistance ratio; MR(%))를 얻었

다[15,16]. 원 모양 IrMn 기반 스핀밸브 박막 면상과 외부 자기장을 수평으로 하고 전류 방향이 자화 용이축에 직교하는 두 단자로 전압을 측정하여 얻은 평면 홀 저항(PHR) 및 평면 홀 전압(planar hall voltage, PHV)의 특성을 각각 조사하였다.

III. 실험결과 및 토의

반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV인 Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) 다층박막에 대해 자기저항 곡선을 측정하기 위한 4개의 단자와 시료의 실제 모양을 Fig. 2(a)에서 보여주고 있다. 다층박막 증착 중 형성된 자화 용이축 방향과 외부 자기장 방향과 함께 Fig. 2(a)에서 보여주고 있는 패턴된 GMR-SV 박막에서 4개의 단자 중 전류 단자와 전압 단자는 모두 같은 방향으로 설정하였다. 막대 모양의 일자형 패턴과 원 모양의 십자형 패턴으로 두 가지를 모두 사용하여 자기저항 곡선을 측정하였다. 그 결과 초기저항값의 차이가 있었으나 곡선의 모양과 자기저항비는 동일하여 막대형 패턴에 대해 주 루프와 소 루프의 자기저항 곡선을 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에서 각각 나타내었다. GMR-SV 다층박막 구조에서 IrMn층의 두께가 10 nm일 때, 서로 샌드위치(sandwich) 구조를 이루고 있는 두께 2.0 nm의 비자성체 Cu 층을 사이에 둔 두 강자성체의 NiFe/CoFe 자유층과 CoFe 고정층 간의 상호교환결합력은 약 12.0 Oe 이었다. 반강자성체 IrMn 층에 고정된 CoFe층의 보자력과 교환결합력은 각각 50 Oe, 230 Oe 이었다. 반면에 자유층 NiFe/CoFe의 보자력은 5.0 Oe를 유지하였다. 4단자에서의 표면 저항과 자기저항비 그리고 히스테리시스 형태의 가장 가파른 점에서 자장감응도는 각각 25.8 Ω, 5.4%, 2.5%/Oe 이었다.

Fig. 3의 중심부에서 보여주고 있는 바와 같이 자기저항 측

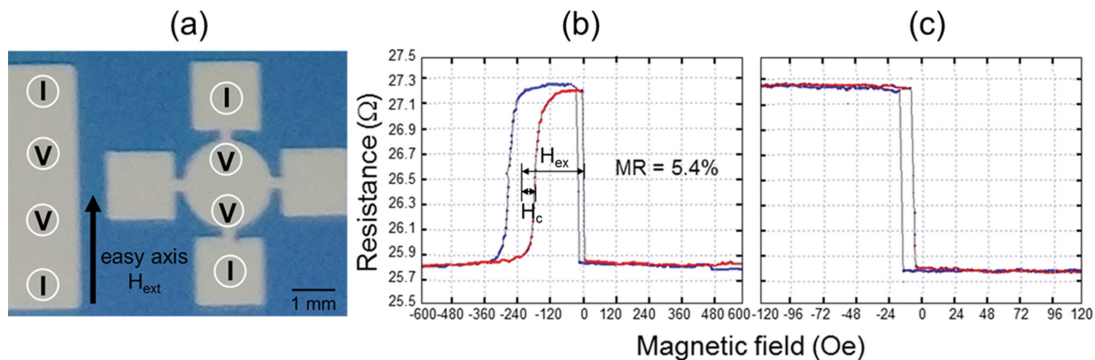


Fig. 2. (Color online) (a) Real photograph for two patterned samples with a rectangular line-type and a circular cross-type multilayers. The magnetic easy-axis is the same of current direction through to two electrodes. (b) The major MR curve and (c) the minor MR curve for the Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) multilayer having a MR = 5.4%. Here, the direction of applied magnetic field to measure the MR ratio is the longitudinal direction same to magnetic easy axis.

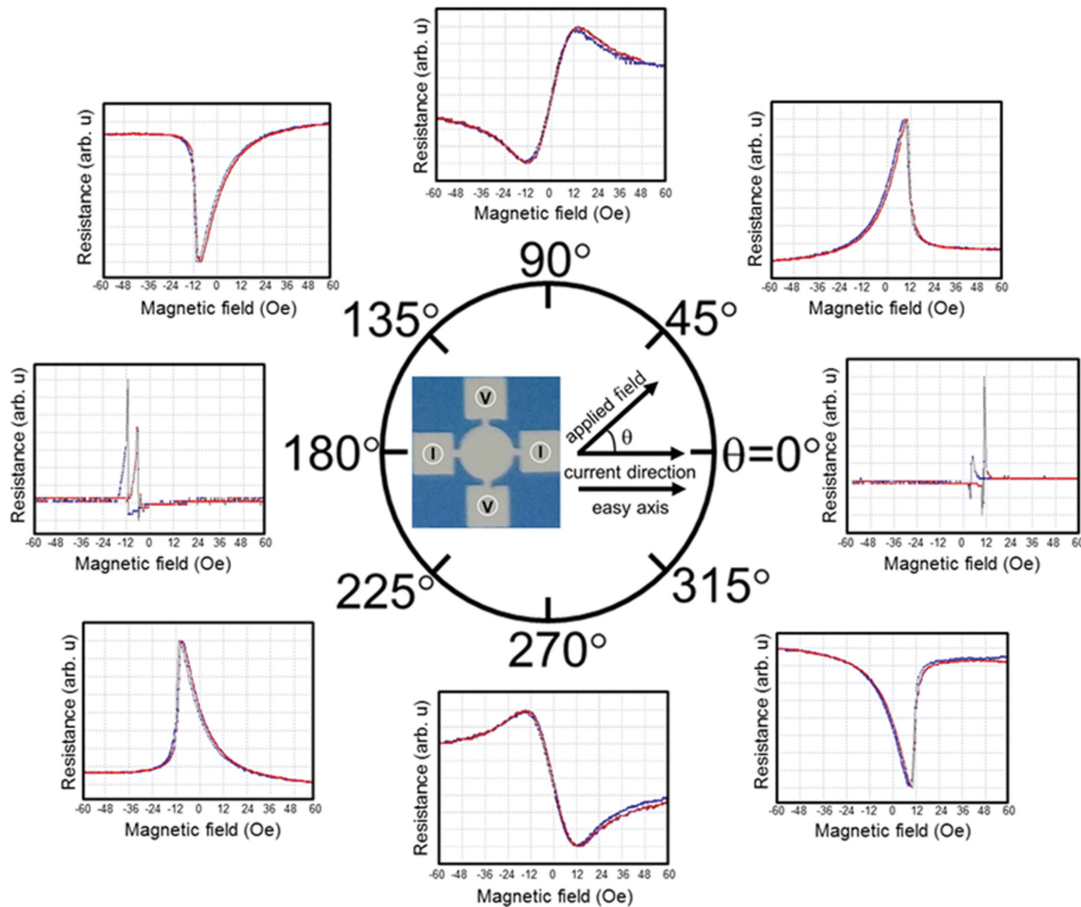


Fig. 3. (Color online) In the sample having a circular cross-type pattern of Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)/Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) multilayer applied by the uniaxial deposition field, the planar hall magnetoresistance curves measuring according to one rotational angles ($\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$). Here, the direction of applied magnetic field to measure the MR ratio is the longitudinal direction same to magnetic easy axis.

정 시 박막 시료의 수평 면상으로 인가하는 외부 자기장 방향은 막대형 박막 시편에 공급되는 전류 단자와 수평한 방향이 되게 하였다. 패턴된 박막 시료의 전압 단자는 전류 단자와 서로 직교하여 평면 홀 저항(PHR)과 동일한 측정방법을 유지하였다. 전류 단자에 인가하는 dc 전류값은 13.86 mA로 고정하였다. 자기저항 곡선을 나타내기 위해 인가된 자기장 세기는 주 루프 측정 시 가우스미터에 표시되는 최대 자기장 값은 -60 Oe에서 +60 Oe이다. 측정 데이터량과 분해능을 결정하는 함수발생기의 주파수는 0.7 mHz로 고정하였다. 박막의 수평 면상을 따라 시료를 회전시켜 외부 자기장 방향과 전류 방향 간의 사이 각도 구간 $\theta = 0^\circ$ 에서 $+360^\circ$ 까지 자기저항을 측정하였다[11,16].

Fig. 3와 같이 x-축 방향을 자화 용이축 방향과 같게 하였다. Fig. 1(c)에서 보여주고 있는 원형 모양의 GMR-SV 박막을 지나는 전류 단자 방향이 용이축 방향과 같게 하고, 전압 단자 방향과는 수직이 되도록 설정하였다. 외부 자기장 (H_a) 방향을 박막 수평 면상을 따라 회전각을 증가시켜서 하

나의 사이클 동안 45° 씩 증가하여 4-단자법으로 자기저항 곡선을 측정하였다. Fig. 3은 PHR 측정법과 같은 외부 자기장 방향을 0° 에서 $+360^\circ$ 까지 회전한 후 45° 간격으로 측정된 자기저항 곡선이다. 즉 박막 면상으로 인가하는 외부 자기장 방향을 박막 증착 시 일축 이방성 방향과 45° 로 달리하였다. 외부 자기장 방향이 용이축 방향과 각도를 이루게 하여 -60 Oe와 +60 Oe 사이를 측정한 주 루프 평면 홀 자기저항 곡선을 나타낸 것이다.

일축 이방성이 유도된 NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm) 다층박막 시료의 수평 면상에 따른 자화 용이축에 대해 회전각을 45° 간격마다 측정하였다. 주 루프 자기저항 곡선으로 8개의 자기저항 곡선에서 ± 60 Oe에서 초기 수평 면상 홀 저항값은 1.167Ω 로 이에 따른 평면 홀 자기저항비는 최소 12.56%에서 최대 18.65%까지이었다. 특히 수평 면상 회전각의 45° 와 225° 에서 측정된 평면 홀 자기저항 곡선은 각각 18.53%과 19.35%로 양(+)의 자기저항비를 나타내었다. 회전각의 135° 와 315° 에서 측정된 평면 홀 자기저항 곡선은 각각

17.5%와 15.6%의 자기저항비를 나타내었다. 특히 회전각이 90°와 270°일 경우에는 전류 전극과 전압 전극이 중앙에 있는 원을 공유하면서 직교하는 상태이다. 4단자의 전압 단자와 외부 자기장 방향이 평행이고 두 전류 단자로 흐르는 전류 방향과 외부 자기장 방향과 수직으로 일치하게 된다. 이때 나타내는 평면 홀 저항값은 1.167 Ω 이었다. 자기저항비는 12.56%로 0 Oe를 중심으로 ±12.0 Oe 이내에서 선형적으로 대칭하는 평면 홀 자기저항 곡선을 나타내고 있다. 이로 하여금 미세 자기장의 변화에 매우 민감하게 선형적으로 자기저항 곡선을 나타냄을 확인할 수 있다.

평면 홀 자기저항 곡선에서 중요한 ±12.0 Oe에서의 외부 자기장은 Fig. 2(c)에서 보여주고 있는 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막의 소 루프 자기저항 곡선에서 사잇층 Cu 두께에 크게 의존하는 Cu 층 아래 위의 층으로 각각 인접한 고정층 CoFe와 자유층 NiFe/CoFe 간의 상호교환결합력은 12 Oe 이다. 따라서 자기장 방향에 따른 PHV의 특성은 GMR-SV 다층박막에서 Cu 층을 사이에 둔 고정 강자성층과 자유 강자성층 간의 상호교환결합력에 의한 일축 이방성의 특성으로 간주할 수 있다. 또한 선형적인 특성의 감도를 나타내는 기울기는 자유층인 CoFe/NiFe 이중박막의 보자력에 의존할 것

로 보여진다. 이러한 특성을 상세하게 관찰하기 위해 외부 자기장 ±60 Oe 이내 평면 홀 저항 및 평면 홀 전압 곡선을 Fig. 4와 Fig. 5에서 비교하여 분석하였다.

회전각이 $\theta=90^\circ$ 일 때, 외부 자기장이 ±24 Oe 범위 내 전류 방향이 자화 곤란축과 평행 또는 수직으로 하여 측정된 PHV의 주 루프 곡선을 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서 각각 나타내었다. 전류 단자에 흐르는 전류값은 13.86 mA로 전압 단자에서 측정된 저항값과 출력 전압값은 각각 1.167 Ω과 2.4 mV 이었다. 두 곡선이 유사한 형태로 나타내고 있는 자화 곤란축 방향과 외부 자기장 방향이 수직으로 있기 때문이다. 외부 자기장이 없는 0 Oe에서 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 곡선을 비교해 볼 때 Fig. 4(b)에서 보다 조금 큰 비가역적 곡선을 보여주고 있다. 이것은 반복실험을 통하여 확인한 결과 바가역적 곡선의 차이가 실험적인 오차범위 안에 있다고 사료된다. 자화 용이축 방향에서 전류 단자와 전압 단자를 선택하더라도 외부 자기장 방향은 자화 용이축 방향과 반드시 수직을 유지하여야 한다. PHR 센서를 응용하기 위해서는 가역적인 특성을 갖도록 낮은 자기장 변화에도 선형적으로 출력 신호가 생성되어야 한다. 따라서 4단자에서 전류 방향은 자화 용이축 방향으로 직교하는 전압의 두 단자 방향은 외부

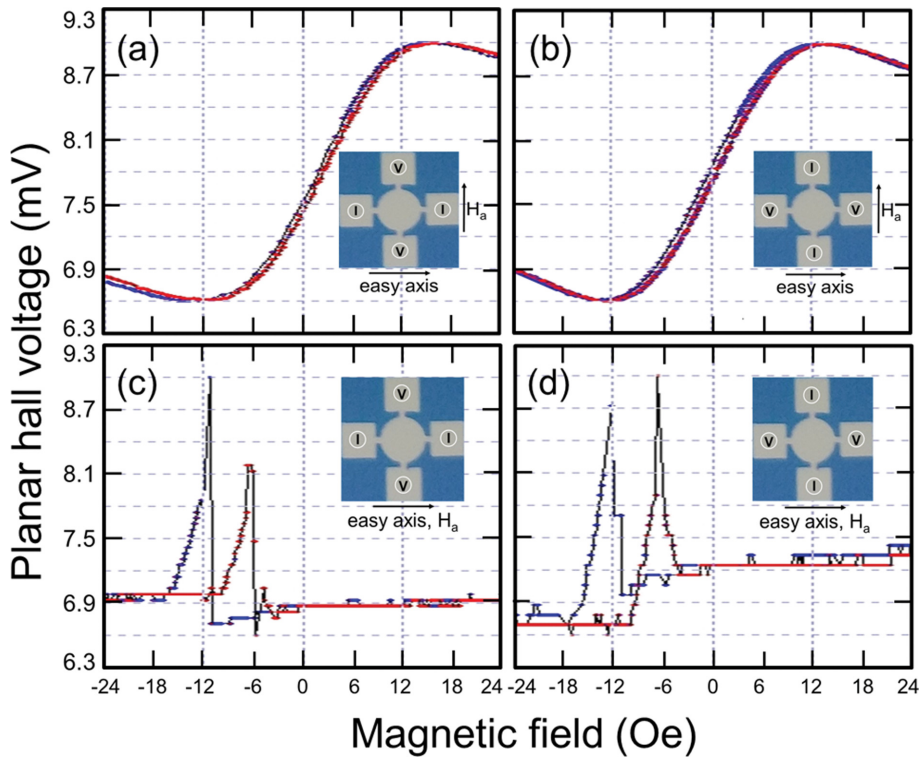


Fig. 4. (Color online) The planar hall voltage (PHV) curves according to two different rotation angles of $\theta=90^\circ$ (easy axis (a) \parallel and (b) \perp current flow) and $\theta=0^\circ$ (easy axis (c) \parallel and (d) \perp current flow) versus the applied magnetic field (H_a) for the Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)/Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) multilayer. Insets are shown the real patterns with four electrodes and two directions of easy axis and H_a .

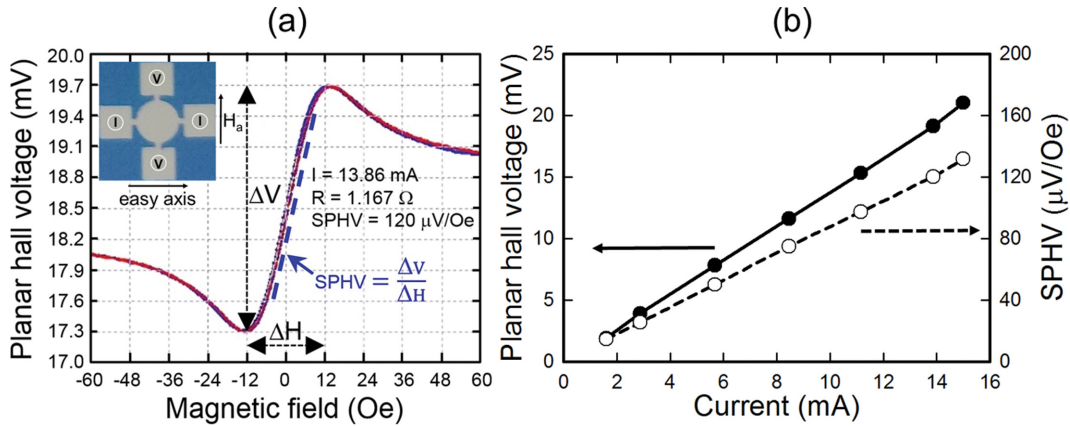


Fig. 5. (Color online) (a) The planar hall voltage (PHV) curve versus the applied external magnetic field (H_{ext}) for the Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) multilayer. Inset is shown the real pattern with four electrodes and two directions of easy axis and H_a . The difference of PHV, resistance, and sensitive PHV inside of ± 12 Oe is 2.4 mV, 1.167 Ω , and 120 $\mu\text{V/Oe}$ at a current of 13.86 mA, respectively. (b) The variation trend of PHV and sensitive PHV (SPHV) versus the sensing current. Here both PHV and SPHV are linearly increased according to the increase of current.

자기장 방향과 같아야 한다.

자화 용이축 방향과 외부 자기장 방향을 항상 평행으로 고정하여 회전각이 $\theta = 180^\circ$ 일 때, 외부 자기장 ± 24 Oe 범위 내 전류 방향이 자화 곤란축 방향과 평행 또는 수직으로 하여 측정된 PHV의 소 루프 곡선을 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에 각각 나타내었다. 두 곡선이 유사한 형태로 외부 자기장 사이클에서의 피크값은 각각 -11.5 Oe와 -6.5 Oe 이었다. 여기서 Fig. 2(c)의 소 루프 자기저항 곡선에서 나타낸 히스테리시스 두 개의 중간으로 해당되는 외부 자기장에 따른 값은 일치하였다.

Fig. 5는 중앙에 원 중심에 직교하는 전류 단자와 전압 단자에서 폭 0.5 mm와 직경 2 mm로 Ta(5 nm)/NiFe(7 nm)/CoFe(2 nm)Cu(2 nm)/CoFe(3 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) 다층 구조의 박막 시료에 대해 ± 60 Oe의 외부 자기장 영역과 회전각이 $\theta = 90^\circ$ 에서 4단자법으로 전류를 13.4 mA 값으로 측정된 PHV 곡선이다. Fig. 5(a)에서 선형적으로 특성을 나타내는 구간은 ± 12 Oe 이내 있었음을 살펴볼 수 있도록 굵은 점선으로 기울기를 표시하였다. 외부 자기장 0 Oe 근방에서 점선의 기울기를 평면 홀 전압 감도(sensitive planar hall voltage, $\text{SPHV} = \Delta V / \Delta H$)로 정의하여 그 값은 120 $\mu\text{V/Oe}$ 이었다. 여기서 자기저항 곡선에서의 자기저항비와 자장감응도(magnetic sensitivity, MS)는 12.56%와 0.63%/Oe로 히스테리시스가 거의 없는 감도의 특성을 보이고 있다. 즉 선형적으로 자기장 구간의 간격을 줄이고 PHV의 값을 크게 올릴 수 있는 방법을 제시하고 있다. 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막에서 자유층과 고정층 간의 상호교환결합력을 최소화하여 SPHV를 결정짓는 선형 구간을 줄이는 방법으로 Cu 층의 두께를 조절하는 것이 필요할 것으로 보여진다.

Fig. 5(b)는 중심원의 크기가 매우 작은 미세 패턴으로 소자가 제작되어도 출력신호를 높이기 위해 인가되는 전류값이 증가하여도 안정된 PHV 출력값의 특성을 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 특성을 갖는 시료를 직교하는 전압 단자와 전류 단자에 인가하는 전류값을 1.6 mA에서 15.0 mA까지 증가함에 따라 PHV와 SPHV는 모두 선형적으로 증가하였다. PHV의 특성으로부터 PHR은 1.167 Ω 로 일정한 값을 유지하였다. 또한 전류값이 1.6 mA와 15.0 mA일 때, SPHV는 각각 14.45 $\mu\text{V/Oe}$ 와 131.6 $\mu\text{V/Oe}$ 이었다. 전류가 3.4 mA 증가함에 따라 SPHV는 117.15 $\mu\text{V/Oe}$ 만큼 선형적으로 크게 증가하였다. 이러한 실험결과는 원형 모양의 반강자성체 기반 GMR-SV 다층박막에서 자유층과 고정층 간의 상호교환결합력과 자유층의 보자력을 최소화하는 박막 제작조건을 적용하여 개선된 원형 PHR 센서가 초고감도 바이오 융합소자 개발에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서의 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn/Ta 다층박막은 증착 시 그림자 마스크를 사용하여 지름 2.0 mm 크기에 막대 모양의 일자형 패턴과 원 모양의 십자형 패턴으로 제작되었다. 원 모양의 패턴으로 중심에 직교하는 전류 단자와 전압 단자를 형성하여 측정 시 인가한 외부 자기장 방향을 박막 면상에 수평으로 설정한 후 회전각에 따라 PHR 측정법으로 자기저항 곡선을 각각 얻었다. 일자형 자화 용이축과 같은 방향으로 흐르는 전류로 측정된 GMR-SV 다층박막의 자기저항 소 루프 곡선에서 상호교환결합력, 보자력 및 자기저항비는 각각 12.0 Oe, 5.0 Oe,

5.4% 이었다. 외부 자기장 방향과 전류 방향에서 자화 곤란 축으로 수직을 이루고 PHV를 측정하였다. 선형적인 PHV 곡선의 특성을 나타내는 ±12 Oe 이내 구간에서 2.4 mV의 홀 전압으로 차이를 보여주었다. 외부 자기장 0 Oe 근방에서 점선의 기울기는 SPHV 120 μV/Oe 이었다. 평면 홀 자기저항 곡선에서 얻을 수 있는 자기저항비가 12.56%이고 0.63%/Oe의 자장감응도를 보여주었다. 또한 전류 단자에 인가하는 전류값을 1.6 mA에서 15.0 mA까지 증가함에 따라 평면 홀 전압과 감도인 SPHV는 모두 선형적으로 증가하였다. 반강자성체 기반 GMR-SV 다층박막에서 상호교환결합력과 자유층의 보자력을 줄이는 사잇층 Cu 층의 두께를 최적화하는 박막 제작조건을 적용하여 초고감도 바이오 융합소자로 개선된 원형 PHR 센서 개발에 응용 가능하다.

감사의 글

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 기초 연구 사업 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2016R1D1A1B03936289)의 결과입니다.

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. H. Park, K. S. Soh, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *J. Magn.* **13**, 30 (2008).
 [3] D. H. Nam, W. B. Lee, Y. S. Hong, and S. S. Lee, *Sensors* **13**, 4714 (2013).
 [4] S. J. Oh, T. Q. Hung, S. K. Ananda, C. G. Kim, and D. Y. Kim, *J. Kor. Soc. Nondestructive Testing* **28**, 421 (2008).
 [5] F. N. Van Dau, A. Schuhl, R. J. Childress, and M. Sussiau, *Sens. Actuators, A* **53**, 256 (1996).
 [6] L. Ejsing, M. F. Hansen, A. K. Menon, H. A. Ferreira, D. L. Graham, and P. P. Freitas, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4729 (2004).
 [7] T. Q. Hung, S. Oh, B. Sinha, J. R. Jeong, D. Y. Kim, and C. G. Kim, *J. Appl. Phys.* **107**, 09E715 (2010).
 [8] S. Y. Yoo, B. H. Lim, I. C. Song, C. G. Kim, and S. J. Oh, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 200 (2013).
 [9] D. Y. Kim, B. S. Park, and C. G. Kim, *J. Appl. Phys.* **88**, 3490 (2000).
 [10] S. S. Yoon, D. Y. Kim, J. H. Lee, S. J. Kim, and C. G. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **29**, 166 (2019).
 [11] J. G. Choi and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **29**, 231 (2019).
 [12] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
 [13] W. I. Yang, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 32 (2018).
 [14] M. Bolormaa, P. Khajidmaa, D. G. Hwang, S. S. Lee, W. H. Lee, and J. R. Rhee, *J. Korean Magn. Soc.* **25**, 117 (2015).
 [15] J. G. Choi, B. U. Kang, S. S. Lee, and P. Khajidmaa, *J. Korean Magn. Soc.* **29**, 42 (2019).
 [16] P. Khajidmaa, J. G. Choi, and S. S. Lee, *J. Magn.* **22**, 7 (2017).