

## The Study on a High Sensitivity as Planar Hall Biosensor by using the NiFe/Ta(t)/NiFe Film

Sang-Suk Lee\*

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

(Received 8 October 2020, Received in final form 21 October 2020, Accepted 22 October 2020)

As a device that measures a fine magnetic field to be used as a biosensor, a simple multilayered cross-shaped current and voltage terminals are formed. The sensitivity of planar Hall voltage sensitivity (SPHV) were obtained from the planar Hall voltage (PHV) curve, which was measured by applying an external magnetic field perpendicular to the magnetization easy axis. The PHV curve for the NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm) multilayer changed linearly in the region of  $\pm 0.9$  Oe, and the SPHV was  $500 \mu\text{V/Oe}$ . In particular, as the increased sensing current from 1.0 mA to 40 mA, the SPHV was from 2.0 mV/Oe to  $398 \mu\text{V/Oe}$ . These results suggested the possibility of developing a PHR biosensor with high sensitivity even with a multilayer structure formed of a bottom Ta layer and a ferromagnetic NiFe layer.

**Keywords :** magnetic easy axis, sensing current, planar Hall voltage (PHV), sensitivity, bottom layer

## NiFe/Ta(t)/NiFe 박막을 이용한 평면홀 바이오센서로서 고감도 특성 연구

이상석\*

상지대학교 한방의료공학과, 강원 원주시 상지대길 84, 26339

(2020년 10월 8일 받음, 2020년 10월 21일 최종수정본 받음, 2020년 10월 22일 게재확정)

바이오센서로 활용할 미세한 자기장을 측정하는 소자로서 단순한 다층박막 십자 모양의 전류단자와 전압단자를 형성하였다. 자화용이축과 수직으로 외부자기장을 가하여 측정된 평면홀전압(PHV) 곡선으로부터 평면홀전압 민감도(SPHV)를 구하였다. NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm) 다층박막 구조 시료에 대한 PHV 곡선은 외부자기장 0 Oe를 중심으로  $\pm 0.9$  Oe 미세한 자기장 영역에서 선형적으로 변하였고, SPHV가  $500 \mu\text{V/Oe}$ 인 민감도 특성을 보였다. 특히 센싱전류가 1.0 mA에서 40 mA 증가함에 따라 SPHV는  $398 \mu\text{V/Oe}$ 에서 2.0 mV/Oe로 나타났다. 이러한 결과는 바닥층 Ta 층과 강자성체 NiFe 층으로 형성된 다층박막 구조로 높은 감도를 갖는 PHR 바이오센서로 개발할 수 있는 가능성을 제시하였다.

**주제어 :** 자화용이축, 센싱전류, 평면홀전압 (PHV), 민감도, 바닥층

### I. 서 론

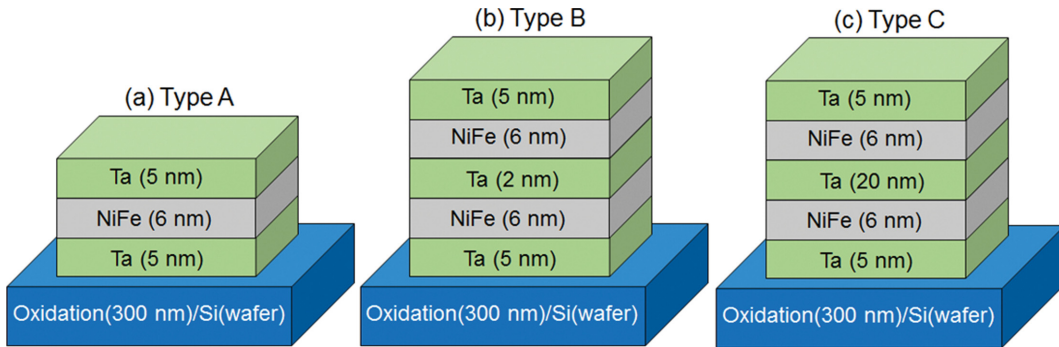
홀(Hall) 소자는 수직으로 인가하는 외부자기장의 변화에 따라 전압을 출력하는 형태이다. 인듐(In)과 안티몬(Sb) 기반 상업용 반도체 홀 소자는 미세한 자기장  $\pm 10$  G 범위를 센싱하여 거리 및 사물유무 속도 측정기, 플터형 개폐기 뿐만 아니라 의료용 맥진센서로도 활용되고 있다[1,2]. 한편, 홀 소자 형태 자성 다층박막에 수평으로 인가하는 외부자기장의 변화

에 따라 자기이방성 효과로 인해 발생하는 평면홀저항(planar Hall resistance, PHR) 감도를 높이고 응용하는 소자 개발 연구가 꾸준히 진행되고 있다[3-5]. 이러한 PHR 센서는 주로 반강자성체 기반 이층박막이나 거대자기저항-스핀밸브(giant magnetoresistance?spin valve; GMR-SV) 다층박막 구조로 이루어져 있다. IrMn/Cu/NiFe 이나 IrMn 기반 GMR-SV 다층박막 구조에서 강자성체층 박막에 대한 특성을 고려하여 자장감응도(magnetic sensitivity, MS)를 향상시키기 위해서는 반강자성체층과 강자성체층 사이의 Cu 층의 두께나 두 강자성체 NiFe 층의 사이에 있는 Cu 층의 두께를 최적화시켜야 한다[5,7]. PHR 센서는 4단자를 사용하는 것과 낮은

© 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



**Fig. 1.** (Color online) Three different types of the multilayer samples having (a) a single ferromagnetic layer (Type A), (b) and (c) a dual ferromagnetic layers (Type B and Type C). Here the thicknesses of middle Ta layer for Type B and Type C are the 2 nm and 20 nm, respectively.

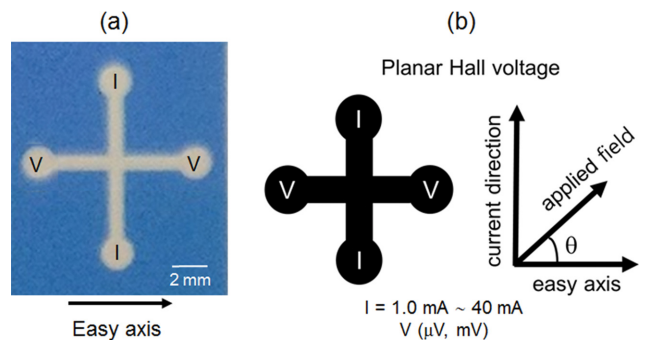
출력전압을 갖는 단점이 있으나 미세 패턴이 단순할 뿐 아니라 높은 신호-잡음비와 낮은 오프셋 전압의 장점을 갖고 있다[4].

한편 생체의학 응용분야를 위한 자성나노입자나 비드는 엄청난 관심을 받고 있는 연구 분야로 발전되어 왔다. 자성나노입자는 일반적으로 순수 금속, 금속 산화물 및 자기 나노복합체로 분류된다[8]. 생의학 분야에서 가장 널리 사용되는 자성나노입자는 Co, Fe, Ni, Ti, 산화철 및 일부 페라이트이다. 일반적으로 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>의 산화철 나노입자는 독성이 낮기 때문에 가장 많이 사용된다[8]. 자성나노입자가 생체분자와의 생화학적 반응을 일으켜 불게 됨으로써 입자의 거동이나 자기 고열(hyperthermia)의 치료 능력은 외부 열 자극으로 활용할 때 크게 향상된다[9,10]. 적혈구나 타겟 세포의 항체로 이루어진 생체분자와 결합시킨 자성나노입자를 검출하는 연구결과가 꾸준히 보고되었다[10,12,13]. 여러 개의 자성비드나 자성나노입자들로부터 나오는 미세자기장의 세기를 측정하기에 적합한 바이오센서 개발의 필요성이 대두되는 시점에서 이르렀다[12]. 즉, 생체분자에 결합한 자성나노입자들의 미세한 자성을 측정하는 바이오센서로서 높은 민감도를 갖는 자성박막의 구조를 얻는 것이 필요하다[14-16].

본 연구는 강자성체 NiFe 층과 바다층과 보호층으로 사용되는 Ta 층으로만 이루어진 NiFe/Ta/NiFe 다층박막 구조에 대해 PHR 소자로서의 민감도 특성을 연구하였다. 세 가지 종류의 자성 다층박막들인 Ta/NiFe/Ta, Ta/NiFe/Ta/NiFe/Ta를 제작하여 이에 대한 PHV 곡선들을 측정하였다. PHR 자기저항비와 자기장이 0 Oe 근처에서 PHV 민감도(sensitivity of planar Hall voltage, SPHV)의 특성을 비교 분석하였다. 하부 NiFe 층과 상부 NiFe 층 사이에 Cu 층의 두께와 센싱전류의 증가가 PHR 자기저항비와 MS, SPHV를 고감도로 유지시키므로 바이오센서의 출력을 높이는 다층구조의 최적조건을 논의하였다.

## II. 실험 방법

자성체와 비자성체 다층박막 시료는 300 nm의 산화층(SiO<sub>2</sub>)이 형성된 붕소가 도핑된 450 μm 두께의 p-형 Si 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 박막은 DC 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 시스템을 이용하여 제작하였다[5,6]. 고진공 챔버 내 설치된 증착 시스템은 2개의 3-인치 타겟과 마그네트론 스퍼터링 건(gun) 장치들이 각각 분리되어 있다. 박막 증착 시 기판이 양쪽에 영구자석 사이에 놓도록 장착하였다. 박막이 증착되는 시료에서 중심부의 자기장 크기는 350 Oe이었다[6,7]. Ta와 NiFe의 두 개의 타겟들을 스퍼터링하여 증착한 각 Ta 층의 두께를 다르게 하여 Ta/NiFe/Ta와 NiFe/Ta/NiFe 다층구조를 Fig. 1에 나타내었다. 강자성체층인 NiFe 박막 사이에 버퍼층과 보호층인 비자성체 Ta 박막이 포함된 Type A인 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), Type B인 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm), 그리고 Type C인 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm)의 박막 시료를 Fig. 1(a), Fig. 1(b), 그리고 Fig. 1(c)에 나타냈다.



**Fig. 2.** (Color online) (a) Photo image of one cross patterned sample by using a shadow mask. In the multilayer sample having a width of 1 mm formed (b) the rotation angle ( $\theta$ ) between the magnetic easy axis and the applied field direction. Here the sensing current is 1.0 mA~40 mA for measuring the PHV curve.

두께 0.1 mm인 황동판 금속 그림자 마스크(shadow mask)를 이용하여 박막 증착 시 선폭 1.0 mm인 십자형 모양의 전극을 Fig. 2(a)와 같이 형성하였다[5]. 십자형 패턴의 교차 부분인 중심으로 박막 시료 실제의 모습을 Fig. 2(a)에 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 패턴된 박막 시료의 x-축 방향으로 자화용이축이 되게 자기장하에서 증착하여 일축이방성을 유도하였다. 박막 시료의 산화막 및 표면오염으로 인한 자기저항 특성의 변화를 최소화하기 위하여 ex-situ 방법으로 인듐(Indium)을 눌러서 바로 전극을 형성시켰다[7]. 패턴된 박막 시료의 전압단자는 전류단자와 서로 직교하는 측정방법을 유지하였다. 전류단자에 인가하는 센싱전류는 1.0 mA에서 40 mA까지 정하였다. 수십에서 수백  $\mu\text{V}$ 와 수 mV의 크기인 평면홀전압(planar Hall voltage, PHV) 측정 시 박막 시료의 수평면상으로 인가하는 외부자기장 방향은 Fig. 2(b)처럼 시편에 공급되는 전압단자와 수평한 방향이 되게 하였다[6,7]. PHV 곡선을 얻기 위하여 인가된 자장의 세기는 -60 Oe에서 +60 Oe이고, 측정 데이터수와 분해능을 결정하는 함수발생기의 주파수는 1.7 MHz이었다. 박막 수평면을 따라 시료를 회전시켜 회전각도 구간  $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ 에서 측정하여 PHV 곡선을 얻었다. 또한 4-단자 전류와 전압 측정 시스템을 이용하여 +10 Oe와 -10 Oe 사이에서 측정한 PHV 곡선으로부터 민감도인 SPHV를 구하여 분석하였다.

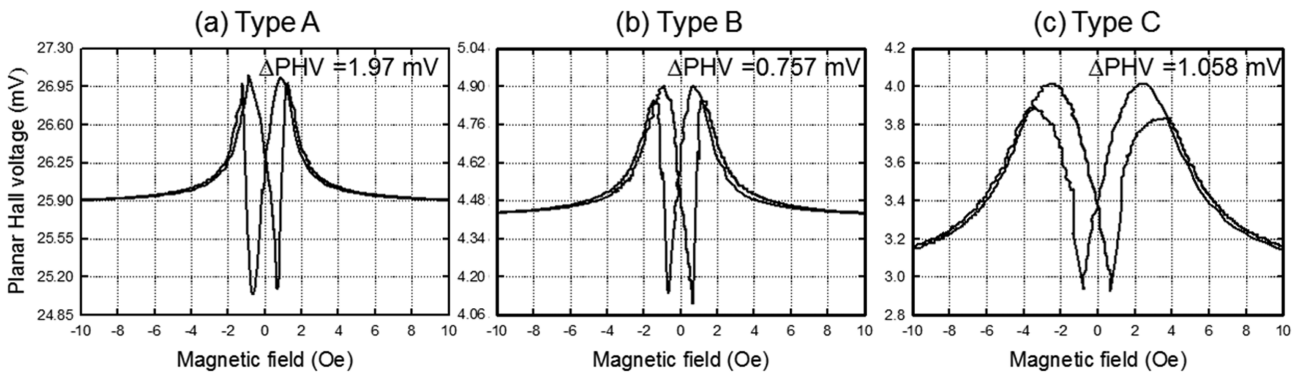
### III. 실험결과 및 토의

Fig. 1에 나타난 3가지 형태의 다층박막 구조의 시료들을 Fig. 2(a)처럼 직각 십자 모양 중심으로 연결된 전류단자용이축과 90° 방향이 되도록 설정하였다. PHV 곡선은 박막 시료에 인가되는 외부자기장의 방향을 박막 수평면을 따라 전압단자 방향과 90°로 하여 4-단자법으로 측정하였다. Type A

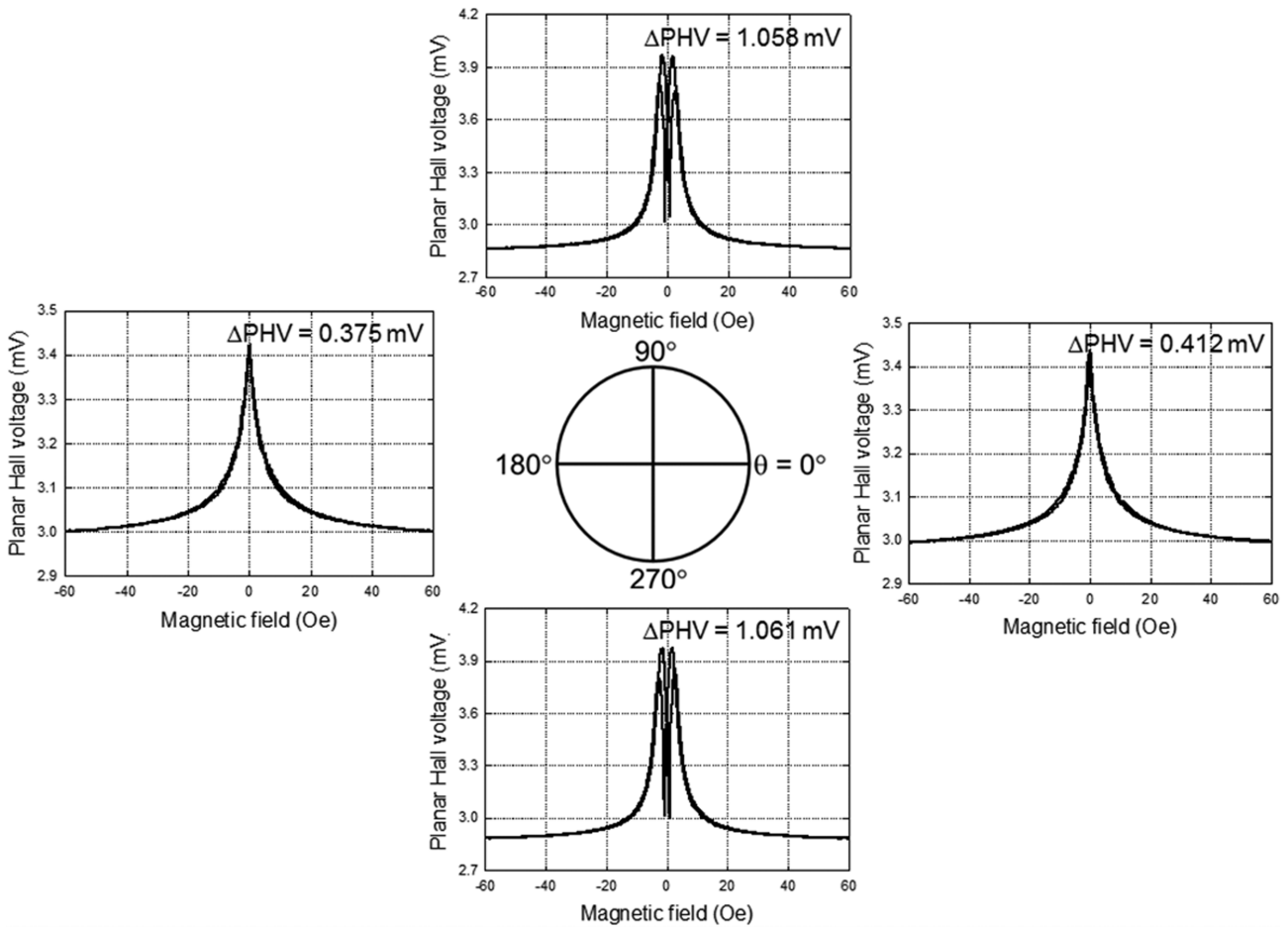
인 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 박막 시료에 대해 센싱전류 10 mA로 측정된 PHV 곡선이 Fig. 3(a)에 나타내었다. 강자성체 NiFe 층의 두께가 6 nm에서 보자력은 0.7 Oe로 측정되었다. 이것은 Type B와 Type C인 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm)와 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 박막 시료에 대해 측정된 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)의 PHV 곡선들에서 보여준 보자력 값은 0.7 Oe로 동일하였다.

자기저항곡선과 동일한 PHV 곡선으로부터 얻은 초기 평면홀저항 값은 Type A, Type B, Type C에 대해 각각 2.59  $\Omega$ , 0.44  $\Omega$ , 0.318  $\Omega$ 로 나타났다. 한편 3가지 형태의 박막 시료들에 대한 PHV 곡선들의 주요 특징은 외부자기장이 0 Oe 근처에서 민감도가 높은 선형적인 특성을 보인다. Fig. 3(a), Fig. 3(b), Fig. 3(c)에 보여준 PHV 곡선들로부터 최대전압 값과 최소전압 값의 차이인  $\Delta\text{PHR}(\text{mV})$ 는 각각 1.970 mV, 0.757 mV, 1.058 mV이었다. 이러한 특성은 나노자성입자-항체 신호를 감지할 수 있는 충분한 PHV 민감도(SPHV)를 결정하는  $\Delta\text{PHR}$  값을 갖고 있다.

Fig. 4는 Type C 시료에 대해 외부자기장과 전압단자 방향인 자화용이축 방향을 0°에서 270°까지 90° 간격으로 회전한 후 측정된 PHV 곡선들이다. 즉 외부자기장 방향을 박막 증착 시 일축이방성 방향과 다르게 박막 면상에서 90°로 바뀌어 외부자기장 방향이 자화용이축과 각도를 이루게 하여 -60 Oe와 +60 Oe 사이를 측정된 PHV 곡선들을 보여주고 있다. 외부자기장  $\pm 60$  Oe 범위에서 측정된 4개의 PHV 곡선들에서 센싱전류 10 mA에 대해 전압 3.0 mV 이므로 초기 평면홀저항 값은 0.3  $\Omega$ 이고,  $\Delta\text{PHR}$  값은 최소 0.375 mV에서 최대 1.061 mV를 보이고 있다. 특히 수평면 회전각 90°와 270°에서 측정된 PHV 곡선들에서 구한  $\Delta\text{PHR}$  값들은 각각 1.058 mV와 1.061 mV를 갖으며, 회전각 0°와 180°에서 측정된



**Fig. 3.** PHV curves for (a) the Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) multilayer, (b) the Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) multilayer, and (c) the Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) multilayer measured at room temperature in external magnetic fields  $\pm 10$  Oe. The measured value of  $\Delta\text{PHV}$  from PHV curves are (a) 1.970 mV, (b) 0.757 mV, and (c) 1.058 mV, respectively. Here a value of sensing current is 10 mA.



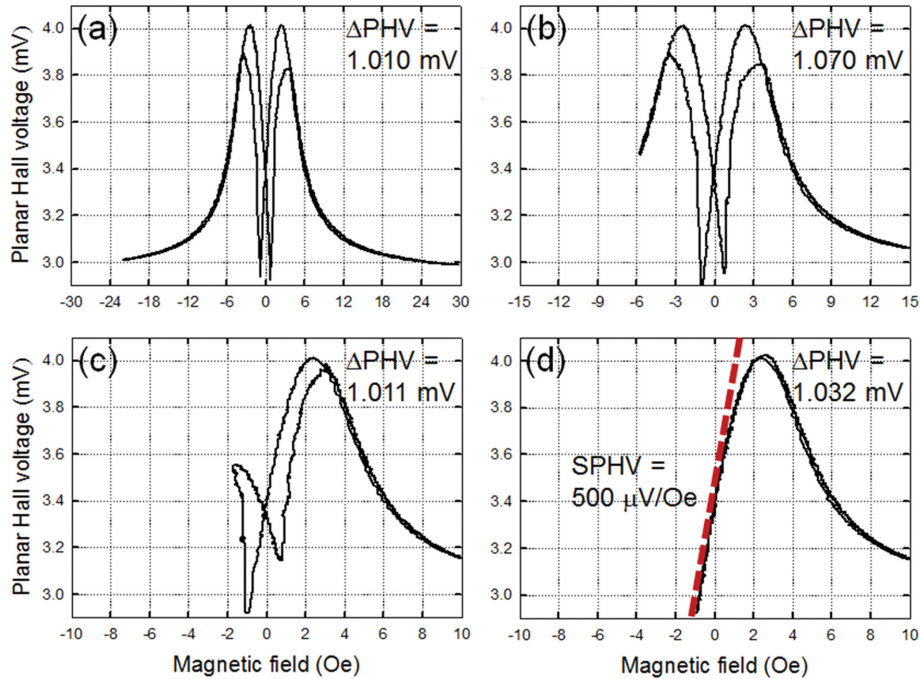
**Fig. 4.** In the sample having a thickness of Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) applied by the uniaxial deposition field, the PHV curves measuring according to one rotational angles ( $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ,$  and  $270^\circ$ ).

PHV 곡선들은  $\Delta PHR$  값들이 각각 0.412 mV와 0.375 mV임을 보였다. 특히 회전각도  $90^\circ$ 와  $270^\circ$ 의 경우에는 전류전극과 전압전극이 중앙에 직교하는 상태에서 4단자의 전류방향과 외부자기장 방향은 같게 하고 전압단자가 외부자기장 방향과 수직이 되게 정하였다. 이때 나타나는 수평홀저항 값은  $0.3 \Omega$  이지만  $\Delta PHR$ 은 최대값은 1.061 mV로 0 Oe를 중심으로  $-0.7$  Oe와  $+1.8$  Oe 이내에서 선형적 대칭 PHV 곡선을 보이고 있으며 미세자기장의 변화에 매우 민감한 PHV 곡선을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 4의 각도에 따른 자기저항 특성곡선의 모양변화는 다층박막 시료의 비저항이 전류방향과 자화용이축 그리고 외부자기장의 방향에 의존하는 자성층들의 스핀 궤도 결합에 의한 자기이방성(anisotropy magnetoresistance, AMR) 효과가 주요하게 나타난 것으로 볼 수 있다[17].

바닥층과 씨앗(seed) 층인 Ta 층과 두 개의 강자성체 NiFe 층 사이에 Ta 층을 삽입하여 형성한 Type B와 Type C 중 Ta 층의 두께가 20 nm인 Type C를 상온과 77 K에서 외부자기장의 인가 범위를  $\pm 50$  Oe로 정하여 PHV 곡선을 측정하였

다. PHV 곡선들은 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 각각 나타내었다. 비자성체인 Ta 박막의 두께를 20 nm로 사이에 두고 두 개의 강자성체인 NiFe층의 두께는 6 nm로 다층박막을 제조하였다. 외부자기장에  $\pm 50$  Oe 범위 내 측정된 PHV 곡선은 0 Oe를 기준하여 대칭적인 곡선 특성을 보였다. 상온에서 측정된 상부층과 하부층의 보자력은 동일한 두께로 1.4 Oe이었고, 하부층과 상부층 간의 상호교환결합력은 형성되지 않으므로 0 Oe이었다.

Fig. 5은 Type C인 Ta/NiFe/Ta/NiFe/Ta 다층구조에 대해 외부자기장 0 Oe 부근에서의 선형적인 PHV 곡선들을 나타낸 것이다. Fig. 5은 GMR-SV 구조나 반강자성체 IrMn층과 강자성체 NiFe층 사이의 교환결합력이 존재하는 이중 박막에서 교환결합력의 크기를 줄이기 위해 Cu층의 두께가 다른 다층구조에 대해 측정된 PHV 곡선들과는 다른 양상을 띠고 있다. Fig. 5(a)는 Type C에 해당하는 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) 다층구조 시료가 형성된 보자력 1.4 Oe의 자기적 특성을 갖는 외부자기장 +30 Oe에서



**Fig. 5.** (Color online) PHV curves for the Ta(5 nm)/NiFe(3 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(6 nm)/Ta(5 nm) multilayer measured at room temperature 77 K in external magnetic fields of (a) -22 Oe~+30 Oe, (b) -6 Oe~+15 Oe, (c) -2 Oe~+10 Oe, and (d) -0.9 Oe~+10 Oe. In the neighbor region of external magnetic field of 0 Oe, the values of  $\Delta\text{PHV}$  and  $\text{SPHV}$  are 1.032 mV and 500  $\mu\text{V}/\text{Oe}$ , respectively.

-22 Oe까지의 센싱전류 10 mA로 측정된 PHV 특성을 보인 것이다. 외부자기장이 없을 시,  $\Delta\text{PHV}$ 은 1.010 mV의 선형적인 감도 특성을 유지하였다. Fig. 5(b)는 외부자기장 +15 Oe에서 -6 Oe까지의 PHV 곡선으로 외부자기장이 0 Oe 부근에서  $\Delta\text{PHV}$ 는 1.070 mV의 선형적인 민감도 특성을 보였다. Fig. 5(c)는 외부자기장 +10 Oe에서 -2 Oe까지의 보자력범위를 벗어난 자기장 영역으로 되돌아오는 PHV 곡선으로  $\Delta\text{PHV}$ 는 1.011 mV를 유지하고 있으나 히스테리시스 특성으로 인해 비대칭적인 특성을 보였다. 한편 Fig. 5(d)는 Type C의 다층구조에서 형성된 보자력이 1.4 Oe의 자기적 특성을 유지한 채로 Ta의 두께 20 nm 사이만큼 분리된 NiFe 층의 AMR 효과로 인한 PHR 특성을 보이고 있다. Fig. 5(d)의 PHV 곡선이 가역적인 경로를 따라 변하고 있으므로 바이오센서의 역할을 하도록 외부자기장이 없는 0 Oe 일 때 선형적인 높은 민감도 특성을 보이고 있다. 즉, 외부자기장 +10 Oe에서 -0.9 Oe까지의 미세한 자기장 영역으로 되돌아오는 0 Oe 부근에서 선형적인 고감도 PHV 곡선을 보이고 있다. 이 때 얻어진  $\Delta\text{PHV}$ 와  $\text{SPHV}$ 는 각각 1.032 mV와 500  $\mu\text{V}/\text{Oe}$ 으로써 미세한 자기장을 측정할 수 있는 바이오센서로서 특성임을 보여 주었다[6,7].

Type C 박막 시료의 전류단자에 센싱전류 1.0 mA에서 40 mA까지 흐르게 하여 전압단자에서 측정된 Fig. 5(d)의 PHV 곡선으로부터 얻은  $\Delta\text{PHV}$ 와  $\text{SPHV}$ 를 전류값의 증가에 따른

특성변화를 분석하였다. 또한 외부자기장 10 Oe에서 PHV 값은 센싱전류값에 따라 일정한 평면홀저항값은 0.315  $\Omega$ 이었다. 외부자기장 +10 Oe에서 -0.9 Oe까지 측정된 PHV 곡선으로부터 선형적 특성을 갖는  $\pm 0.9$  Oe 구간에서 센싱전류가 1.0 mA일 때  $\Delta\text{PHV}$ 는 400  $\mu\text{V}$ 이었고, 그리고  $\text{SPHV}$ 는 490  $\mu\text{V}/\text{Oe}$ 이었다. 센싱전류가 40 mA로 증가하였을 때  $\Delta\text{PHV}$ 와  $\text{SPHV}$ 는 각각 2.0 mV와 2.0 mV/Oe이었다. 센싱전류 값이 1 mA씩 증가함에 따라 PHV와  $\text{SPHV}$ 는 각각 400  $\mu\text{V}$ 와 500  $\mu\text{V}/\text{Oe}$  만큼 선형적으로 증가하였다. 이러한 결과는 반강자성체 IrMn 기반 GMR-SV 박막이나 이중층 박막 구조에서 자유층과 고정층 간의 상호교환결합력을 최소화하거나 반강자성체와 고정층 간의 교환결합세기를 Cu 층의 두께를 조절하여  $\text{SPHV}$ 를 결정짓는 선형 구간을 줄이는 방법으로 제시한 것과 비교할 수 있다[5,7]. 히스테리시스와 자벽으로 인한 노이즈 발생 등을 해결한 반강자성 교환결합으로 단일자구가 형성되어 있는 IrMn/Cu/NiFe 다층구조 뿐만 아니라[3,4], NiFe 박막과 Ta 박막만으로 구성된 이중 다층박막 구조로도 PHR 바이오센서에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

### V. 결 론

본 연구에서는 Ta 층과 NiFe 층으로 구성된 단순한 다층 구조 Ta/NiFe/Ta/NiFe/Ta 자성박막 증착 시 그림자 마스크를

사용하여 폭 1.0 mm 크기의 십자 모양 패턴으로 박막 시료를 제작하였다. 십자 모양 패턴의 중심을 직교하는 전류단자와 전압단자를 형성하여 측정 시 인가한 외부자기장 방향을 박막에 수평으로 설정한 후 자화용이축과 90°로 설정하여 측정된 PHV 곡선으로부터 ΔPHV와 SPHV를 구하였다. NiFe(6 nm)/Ta(20 nm)/NiFe(6 nm) 다층박막 구조 시료의 PHV 곡선은 외부자기장 0 Oe를 중심으로 ±0.9 Oe의 미세한 자기장 영역에서 SPHV가 센싱전류가 10 mA에서 500 μV/Oe 되는 고감도 특성을 보였다. 특히 1.0 mA에서 40 mA로 센싱전류가 증가함에 따라 SPHV가 490 μV/Oe 에서 2.0 mV/Oe 로 증가하였다. 이러한 결과는 강자성체 NiFe 층만으로 형성된 간단한 구조로도 높은 감도를 갖는 PHR 바이오센서로 개발할 수 있는 가능성을 보여주었다.

### 감사의 글

이 논문은 2019년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것입니다.

### References

- [1] D. H. Nam, W. B. Lee, Y. S. Hong, and S. S. Lee, *Sensors* **13**, 4714 (2013).
- [2] A. Baumgartner, T. Ihn, K. Ensslin, G. Papp, F. Peeters, K. Maranowski, and A. C. Gossard, *Phys. Rev. B* **74** 165426 (2006).
- [3] S. J. Oh, T. Q. Hung, S. K. Ananda, C. G. Kim, and D. Y. Kim, *J. Kor. Soc. Nondestructive Testing* **28**, 421 (2008).
- [4] T. Q. Hung, S. Oh, B. Sinha, J. R. Jeong, D. Y. Kim, and C. G. Kim, *J. Appl. Phys.* **107**, 09E715 (2010).
- [5] J. G. Choi and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **30**, 24 (2020).
- [6] J. G. Choi and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **29**, 231 (2019).
- [7] S. H. Noh, S. S. Park, and S. S. Lee, *New Physics* **70**. 1 (2020).
- [8] V. F. Cardoso, A. Francesko, C. Ribeiro, M. Bañobre-López, P. Martins, and S. Lanceros-Mendez. *Adv. Healthcare Mater.* **7**, 1700845 (2018).
- [9] S. B. Campbell, M. Patenaude, and T. Hoare, *Biomacromolecules* **14**, 644 (2013).
- [10] R. W. Y. Habash, R. Bansal, D. Krewski, and H. T. Alhafid, *Crit. Rev. Biomed. Eng.* **35**, 37 (2007).
- [11] J. G. Choi, S. H. Kim, and S. S. Lee, *Adv. Exp. Med. Bio.* **1072**, 345 (2019).
- [12] J. G. Choi, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *J. Elec. Mater.* **48**, 1467 (2019).
- [13] K. S. Butler, D. M. Lovato, N. L. Adolphi, R. Belfon, D. L. Fegan, T. C. Monson, H. J. Hathaway, D. L. Huber, T. E. Tessier, H. C. Bryant, E. R. Flynn, and R. S. Larson, *Cell Transplant.* **22**, 1943 (2013).
- [14] G. Li, S. Sun, R. J. Wilson, R. L. White, N. Pourmand, and S. X. Wang, *Sens. Actuators. A Phys.* **A126**, 98 (2006).
- [15] J. Lee, N. Sato, D. J. B. Bechstein, S. J. Osterfeld, J. Wang, A. W. Gani, D. A. Hall, and S. X. Wang, *Sci. Rep.* **6**, 18692 (2016).
- [16] B. M. de Boer, J. A. H. M. Kahlman, T. P. G. H. Jansen, H. Duric, and J. Veen, *Biosens. Bioelectron.* **22**, 2366 (2006).
- [17] S. X. Wang and A. M. Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, Academy Press, San Diego (1999) pp. 123-176.