

# Low Frequency Permeability of Amorphous CoFeB Thin Film Measured by PHR Sensor

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim\*

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 4 February 2020, Received in final form 15 February 2020, Accepted 17 February 2020)

We measured the permeability of amorphous CoFeB thin film by using second harmonic signals of planar Hall resistance (PHR) sensor. The permeability of amorphous CoFeB thin film measured using PHR sensor was constant value in the low frequency range of 10 Hz~50 kHz. The measured high frequency permeability of amorphous CoFeB thin film was analyzed by complex permeability equation in order to compare with the low frequency permeability. We confirmed that the constant value of low frequency permeability was correspond to the initial permeability of amorphous CoFeB thin film. Thus the PHR sensor could be used to the low frequency permeameter.

**Keywords** : PHR sensor, self-field, thin film, permeability spectrum

## 평면홀 센서를 이용한 비정질 CoFeB 박막의 저주파수 투자율 측정

윤석수 · 김동영\*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2020년 2월 4일 받음, 2020년 2월 15일 최종수정본 받음, 2020년 2월 17일 게재확정)

Planar Hall Resistance(PHR) 센서의 2차 조화파 신호를 이용하여 비정질 CoFeB 박막의 투자율을 측정하였다. 10 Hz~50 kHz의 저주파수 대역에서 측정한 CoFeB 박막의 투자율은 주파수에 따라 일정한 값을 유지하였다. CoFeB 박막의 저주파수 투자율은 고주파수 투자율 측정 결과와 비교 분석하였다. 고주파수 투자율 분석 결과로부터 PHR 센서로 측정한 저주파수 투자율은 초기투자율과 일치함을 확인하였다. 따라서 PHR 센서는 자성 박막의 저주파수 투자율 측정기에 이용할 수 있다.

**주제어** : 평면홀 센서, 자체 자기장, 박막, 투자율 스펙트럼

### I. 서 론

자성 재료의 투자율을 측정하는 장치는 주로 전자기 유도를 이용하기 위하여 코일 센서를 사용한다. 전자기 유도 신호는 주파수, 코일의 감은 수, 자성 재료의 부피 등에 비례하여 증가한다. 이러한 출력 특성을 고려하여 kHz 대역의 저주파수 투자율을 측정하는 PPMS(Physical properties measurement system) 장치는 다중(multi-turn) 코일을 사용하며[1], GHz 대역의 고주파수 투자율을 측정하는 마이크로파 투자율 측정기는(microwave permeameter) 단일(one-turn) 코일을 사용하여 강자성 공명특성 분석에 사용한다[2]. 한편 부피가 작은 자성 나노 입자 또는 자성 박막의 투자율은 코일 센서의 전자기

유도 특성 때문에 주파수가 낮아질수록 분해능이 떨어진다[3-5]. 그러므로 코일 센서의 저주파수 단점을 보완할 수 있는 투자율 측정용 센서의 개발이 필요하다.

거대 자기저항 또는 평면홀 효과를 이용한 자기저항(Planar Hall Resistance, PHR) 센서는 투자율이 낮은 자성 나노 입자를 탐지하는 센서로 사용되고 있다[6-8]. 자기저항 센서는 자기장에 따른 저항 변화를 이용하므로 주파수에 무관한 출력 특성을 가지므로 코일 센서와 달리 저주파수로 갈수록 신호 특성이 감소하지는 않는다. PHR 센서는 전류의 방향과 수직인 방향에서 출력 신호를 측정하며, 특히 자체 자기장을 이용한 2차 조화파 신호는 투자율이 낮은 자성 비드를 측정할 수 있을 정도로 민감도가 우수하다[9]. 따라서 PHR 센서는 저주파수에서 고분해능 투자율 측정용 센서로 활용할 수 있다.

본 연구에서는 PHR 센서의 2차 조화파 신호를 이용하여

비정질 CoFeB(50 nm) 박막의 저주파수 투자율을 측정하였다. 저주파수 투자율은 고주파수 투자율과 비교 분석하였다.

### II. 실험 방법

PHR 소자에 사용한 Ta(5)/NiFe(20)/Cu(0.5)/IrMn(10)/Ta(5) (단위: nm) 구조의 자성 박막은 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Si/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 상온에서 증착하였다. 박막 증착 시 초기 진공은 10<sup>-8</sup> Torr 이하였으며, Ar 공정 압력은 3 mTorr로 하였다. 150 Oe의 자기장을 인가하여 IrMn/NiFe 계면 효과로 나타나는 교환 바이어스의 방향을 센서의 길이 방향(전류의 방향)과 평행하게 형성하였다. PHR 센서의 민감도를 향상하기 위하여 IrMn과 NiFe 사이에 0.5 nm 두께의 Cu를 증착하였다. PHR 소자는 광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 100 × 500 μm<sup>2</sup> 크기로 제작하였다. 제작한 PHR 센서의 현미경 사진, PHR 소자 및 PHR 소자에 사용한 자성 박막의 구조는 Fig. 1에서 보인 것과 같다.

투자율 측정에 사용한 비정질 CoFeB(50 nm) 박막은 5 × 5 mm<sup>2</sup>의 크기로 제작하였으며, VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 자화 곡선도 함께 측정하였다. 투자율 측정에 사용한 PHR 센서의 2차 조화파 신호 I<sub>2</sub>는 Lock-in amplifier(SR830)를 사용하여 측정하였다. PHR 센서에 흐르는 교류 전류의 세기는 I = 55 mA였고, 주파수 f는 10 Hz~50 kHz이었다. 투자율 측정 신호를 최적화하기 위하여 CoFeB(50 nm) 박막 표면의 먼지를 제거한 후, PHR 센서에 밀착 시켰다. 10 MHz~3 GHz의 고주파수 투자율 스펙트럼은 단일 코일을 사용한 마이크로파 투자율 측정기(microwave permeameter)를 사용하여 측정하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

PHR 센서에 흐르는 교류 전류는 주위에 미소한 교류 자체 자기장(self-field, SF)을 만들며, 교류 자체 자기장과 교류 전

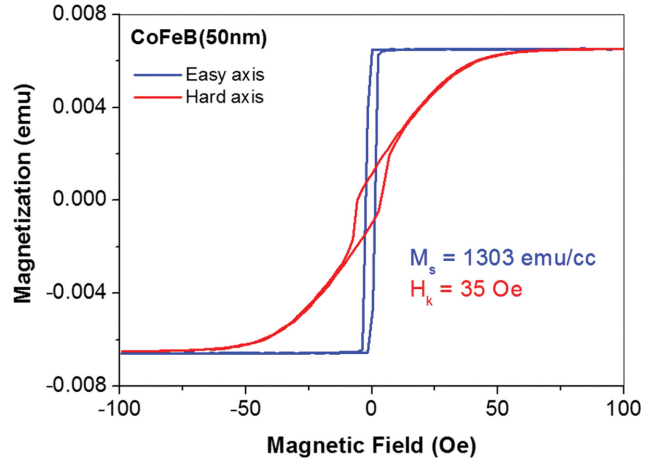


Fig. 2. (Color online) M-H loops of CoFeB(50 nm) thin film measured in easy and hard axis.

류의 곱에 비례하는 2차 조화파 신호 I<sub>2</sub>가 발생한다. Kim 등은 PHR 센서의 I<sub>2</sub>를 이용하여 자성 나노 입자의 농도 변화를 측정하였다. 자체 자기장은 센서 위에 놓인 자성 나노 입자를 자화시키고, 자화된 나노 입자에 의해 유도된 2차 조화파 신호는 나노 입자의 투자율에 비례하는 특성을 이용하였다[9]. 본 연구에서는 PHR 센서의 자체 자기장에 의하여 유도된 2차 조화파 신호를 이용하여 비정질 CoFeB 박막의 저주파수 투자율 스펙트럼을 측정하였다.

Fig. 2는 저주파수 투자율 스펙트럼 측정에 사용한 비정질 CoFeB 박막의 자화 용이축과 자화 곤란축에서 측정한 자화 곡선을 보인 것이다. 자화 용이축에서 측정한 자화 곡선으로부터 CoFeB 박막의 보자력은 H<sub>c</sub> = 1.7 Oe로 낮은 값을 보였으며, CoFeB 박막의 포화자화량은 M<sub>s</sub> = 1303 emu/cc이었다. 한편 자화 곤란축에서 측정한 자화 곡선으로부터 CoFeB 박막의 일축 이방성 자기장은 H<sub>k</sub> = 35 Oe로 측정되었다.

PHR 센서의 수직 방향의 출력 신호는 전류  $\vec{j}$ 와 자화의 단위 벡터  $\vec{m}$ 의 스칼라 곱에 비례한다. 자화의 단위 벡터의 수직 성분 m<sub>z</sub>(전류의 방향과 수직인 방향) 의한 수직 방향

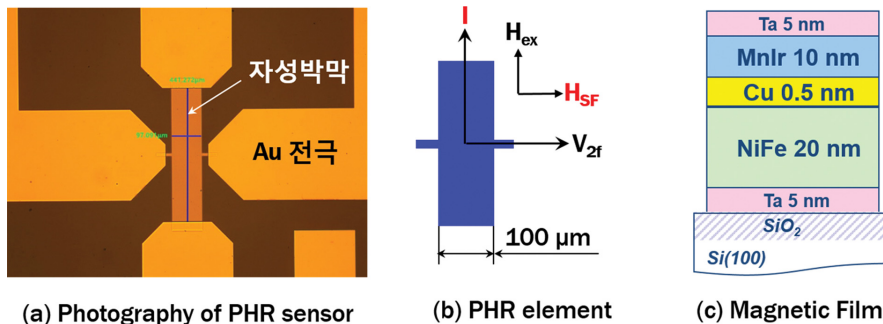


Fig. 1. (Color online) Configuration of PHR sensor. (a) Photography of PHR sensor, (b) PHR element, and (c) magnetic film structure used in PHR element.

의 출력 전압  $V_{\perp}$ 는 다음과 같이 표현된다[10].

$$V_{\perp} = \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t} m_{\perp} (\vec{I} \cdot \vec{m}) \quad (1)$$

여기서  $\rho_{\perp}$  및  $\rho_{\parallel}$ 은  $\vec{I}$ 와  $\vec{m}$ 이 서로 수직과 수평일 때 각각에 대한 비저항이고,  $t$ 는 PHR 센서에 사용한 NiFe 박막의 두께이다. 본 연구에서 사용한 PHR 센서는  $\vec{m}$ 과  $\vec{I}$ 의 방향이 같으므로  $\vec{I} \cdot \vec{m} = I$ 가 되며, 전류의 방향에 수직인 자체 자기장은  $m_{\perp}$ 을 유도한다.  $I = I_0 \cos(\omega t)$ 인 교류 전류를 사용하는 PHR 센서는  $m_{\perp} \cos(\omega t)$ 에 의하여 주파수가  $2f$ 인 2차 조화파 신호를 발생시킨다. 따라서 PHR 센서의 자체 자기장에 의한 2차 조화파의 교류 신호  $V_{2f}(t)$ 는 삼각 함수의 곱의 항등식에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$V_{2f}(t) = \frac{\Delta\rho I}{2t} m_{\perp} \cos(2\omega t) \quad (2)$$

여기서  $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ 이고,  $\omega$ 는 각주파수( $\omega = 2\pi f$ )이다. Lock-in amplifier(SR830)는 제공된 평균(root mean square)을 측정하므로 2차 조화파의 출력 신호는 다음과 같다.

$$V_{2f} = \frac{V_{\max} m_{\perp}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

여기서  $V_{\max} = \Delta\rho I/t$ 는 PHR 센서의 최대 출력 전압이다. 전류가 만드는 자체 자기장은 PHR 소자의 내부( $h_i$ )와 외부( $h_o$ )에서 형성되며, PHR 센서에 사용한 NiFe 자성 박막의 유효 이방성 자기장  $H_{eff}$ 보다 매우 작다. 그러므로  $h_i$ 에 의한  $m_{\perp} = h_i/H_{eff}$ 와 같이  $h_i$ 에 의존한다. 한편  $h_o$ 는 센서 위에 놓인 자성 재료의 투자율에 비례하는 간접적인 의존성을 갖는다. 센서 외부의 자체 자기장  $h_o$ 는 센서 위에 놓인 자성 박막을 자화시키고, 자성 박막의 투자율에 비례하는  $m_{\perp}$ 의 변화가 추가된다. 따라서 센서 위에 자성 박막을 올려놓은 경우,  $m_{\perp}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$m_{\perp} = \frac{h_i + \mu_F A h_o}{H_{eff}} \quad (4)$$

여기서  $t_F$ 는 센서 위에 올려놓은 자성 박막의 두께이며,  $A$ 는 센서 소자의 면적이다. PHR 센서의 자기장 민감도는  $S = V_{\max}/H_{eff}$ 로 정의한다. 센서 위에 자성 박막을 올려놓은 경우, 식(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{2f}^w = V_{2f}^{wo} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \mu_F A S h_o \quad (5)$$

여기서  $V_{2f}^w$ 와  $V_{2f}^{wo}$ 는 PHR 센서 위에 자성 박막을 올려놓은 경우와 자성 박막이 없는 경우 PHR 센서의 2차 조화파

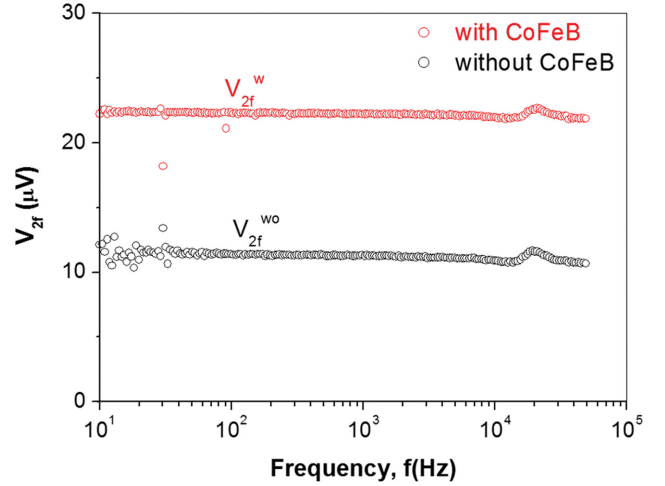


Fig. 3. (Color online) Frequency dependence of  $V_{2f}^w$  and  $V_{2f}^{wo}$  signals with(open red mark) and without (open black mark) CoFeB(50 nm) thin film, respectively.

신호의 출력 전압이다.

Fig. 3은 PHR 센서 위에 CoFeB(50 nm) 박막을 올려놓은 경우와 CoFeB(50 nm) 박막이 없는 경우 각각에 대하여 PHR 센서로 측정된 2차 조화파 신호인  $V_{2f}^w$ 와  $V_{2f}^{wo}$ 의 주파수 의존성을 보인 것이다. 검정 표식은 CoFeB 박막이 없는 경우에 측정된 2차 조화파 신호의 주파수 특성이며, 붉은 표식은 CoFeB 박막이 있는 경우에 대하여 측정된 2차 조화파 신호의 결과이다. 20 kHz 근처에서 보인  $V_{2f}^w$ 와  $V_{2f}^{wo}$ 의 요동은 2차 조화파 신호를 측정하는 장치들에 의한 것으로 CoFeB 박막의 신호와 무관하다.  $V_{2f}^w$ 는  $V_{2f}^{wo}$ 보다 큰 신호 특성을 보였으며, 식(5)에서 보인 것과 같이  $V_{2f}^w$ 의 신호 증가는 센서 위에 놓인 CoFeB(50 nm) 박막에 의한 신호임을 알 수 있다.

식(5)로부터 센서 위에 놓인 자성 박막에 의한 2차 조화파 신호는 다음과 같이  $V_{2f}^w$ 와  $V_{2f}^{wo}$ 의 차이로 표현된다.

$$\Delta V_{2f} = (V_{2f}^w - V_{2f}^{wo}) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mu_F A S h_o \quad (6)$$

CoFeB 박막에 의한 2차 조화파 신호는 식(6)에서 보인 것과 같이 CoFeB 박막의 유무에 따른 2차 조화파 신호의 차이이며, 이는 CoFeB 박막의 투자율에 비례한다. Fig. 4에서 보인 것과 같이 비정질 CoFeB 박막의 2차 조화파 신호  $\Delta V_{2f}$ 는 10 Hz에서 50 kHz까지 14  $\mu$ V의 일정한 값을 유지하고 있었다. 이는 비정질 CoFeB 박막의 투자율이 Lock-in Amplifier의 측정 한계인 50 kHz까지 일정한 값을 유지하고 있음을 의미한다. 이러한 저주파수 투자율 특성을 확인하기 위하여 고주파수에서 측정된 복소 투자율 결과와 계산 결과를 비교 분석하였다.

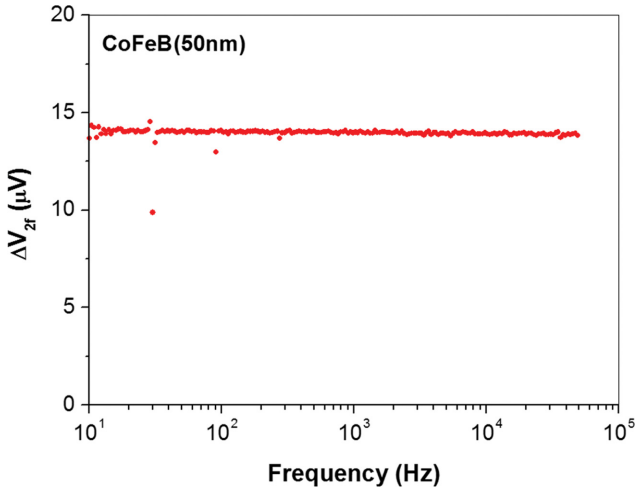


Fig. 4. (Color online) Frequency dependence of  $\Delta V_{2f} = V_{2f}^{w} - V_{2f}^{wo}$  signal.

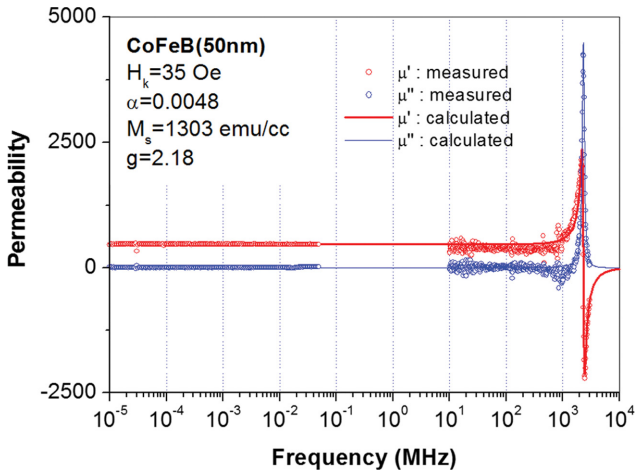


Fig. 5. (Color online) Real and imaginary permeability spectrum of CoFeB(50 nm). The low frequency (10 Hz~50 kHz) permeability spectrum was measured by PHR sensor. The high frequency (10 MHz~3 GHz) permeability spectrum was measured by microwave permeameter.

Fig. 5는 CoFeB 박막을 사용하여 PHR 센서의 2차 조화파 신호로부터 구한 저주파수 투자율과 마이크로파 투자율 측정기로 측정한 고주파수 투자율 스펙트럼을 함께 보인 것이다. CoFeB 박막의 고주파수 복소 투자율 스펙트럼은 2.31 GHz에서 강자성 공명특성이 나타났다. 이러한 CoFeB 박막의 복소 투자율( $\mu^*$ ) 스펙트럼은 다음 수식을 이용하여 계산하였다[11].

$$\mu^* = \frac{\gamma 4 \pi M_s}{\gamma H_k + i \alpha \omega} \left[ \frac{\omega^2}{(\gamma H_k + i \alpha \omega)(\gamma H_k + \gamma 4 \pi M_s + i \alpha \omega) - \omega^2} + 1 \right] + 1 \quad (7)$$

여기서  $\gamma$ 는 자기 스핀의 자이로 계수이고,  $\alpha$ 는 감쇠 상수이

며,  $n$ 는 허수이다.

Fig. 5에서 실선은 식(7)을 이용하여 실수부 및 허수부 투자율 스펙트럼을 계산한 결과이다. 복소 투자율 계산은 Fig. 2에서 보인 자화 곡선으로부터 구한 CoFeB 박막의 포화자화량  $M_s = 1303 \text{ emu/cm}^3$ 과 일축 이방성 자기장  $H_k = 35 \text{ Oe}$ 를 사용하였으며, 고주파수 스펙트럼에서 보인 공명 주파수와 선 폭에 의한 강자성 공명특성을 고려하여 g-factor  $g = 2.18$ 과 감쇠상수  $\alpha = 0.0048$ 을 각각 변수로 사용하였다. 계산을 통하여 얻은 실수부 투자율  $\mu'$ 과 허수부 투자율  $\mu''$ 은 고주파수 복소 투자율 측정 결과와 일치하였다.

실수부 투자율  $\mu'$ 은 10 Hz~50 kHz의 주파수 대역에서 일정한 값으로 계산되었으며, 일정한 투자율은 CoFeB 박막의 초기투자율  $\mu_i$ 임을 계산 결과로부터 알 수 있었다. 식(7)로부터 자성 박막의 초기투자율  $\mu_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_i = 1 + \frac{4 \pi M_s}{H_k} \quad (8)$$

CoFeB 박막의 초기투자율은  $\mu_i = 468$ 로 계산되었으며, PHR 센서로 측정한 10 Hz~50 kHz의 주파수 대역에서 일정한 값으로 측정된 투자율은 CoFeB 박막의 초기투자율이었다. 따라서 PHR 센서로 측정한 투자율은 식(6)으로부터 간단하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = k \Delta V_{2f} \quad (9)$$

여기서  $k$ 는 PHR 센서의 크기, 민감도, 전류, 자성 박막의 두께에 의존하는 비례상수이며, 투자율 센서로 사용할 경우 센서의 보정 상수이다. 식(9)로부터 자성 박막의 투자율은 PHR 센서의 2차 조화파 신호를 이용하여 측정할 수 있다. 또한, Fig. 5에서 보인 것과 같이 고주파수 투자율은 주파수가 낮아지면 분해능이 감소하는 특성을 보이나, PHR 센서로 측정한 저주파수 투자율은 높은 분해능으로 측정되었다. 이러한 결과로부터 PHR 센서는 저주파수 영역에서 분해능이 우수한 투자율 스펙트럼 측정에 활용할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 NiFe/Cu/MnIr 자성 박막을 사용하여  $100 \times 500 \mu\text{m}^2$  크기의 PHR 센서를 제작하였다. 자화 용이축과 평행한 방향으로 흐르는 전류가 만든 자체 자기장에 의해 유도된 2차 조화파 신호를 이용하여 10 Hz~50 kHz의 저주파수 대역에서 비정질 CoFeB 박막의 투자율을 측정하였다. PHR 센서로 측정한 CoFeB 박막의 저주파수 투자율은 고주파수 복소 투자율 측정 결과와 복소 투자율 계산 결과와 비교 분석하였다.

PHR 센서로 측정된 CoFeB 박막의 투자율은 10 Hz~50 kHz의 저주파수 대역에서 일정한 값을 유지하였으며, 이는 복소 투자율 계산식을 이용하여 구한 실수부 투자율과 일치하였다. 투자율 계산 결과로부터 저주파수에서 측정된 일정한 투자율은 초기투자율임을 알 수 있었으며, PHR 센서로 측정된 저주파수 투자율은 합당한 측정 결과임을 확인할 수 있었다. 따라서 자성 박막의 투자율은 PHR 센서의 2차 조화파 신호를 이용하여 측정할 수 있음을 입증하였다.

마이크로파 투자율 측정기로 측정된 고주파수 복소 투자율은 주파수가 낮아지면 분해능이 감소하는 특성을 보였으나, PHR 센서로 측정된 저주파수 투자율은 높은 분해능으로 측정되었다. 이러한 결과로부터 PHR 센서는 저주파수 영역에서 분해능이 우수한 투자율 스펙트럼 측정에 활용할 수 있으며, 저주파수 영역에서 자성 박막의 물성 연구에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다. PHR 센서 제작에 도움을 주신 DGIST 김철기 교수님과 이재훈 학생에게 감사드리며, CoFeB 박막 제작과 마이크로파 투자율 측정에 도움을 주신 일본 도호쿠 대학의 (고)다카하시 교수님께 감사드립니다.

### References

- [1] <https://www.qdusa.com/products/ppms.html>.
- [2] S. X. Wang, N. X. Sun, M. Yamaguchi, and S. Yabukami, *NATURE* **407**, 150 (2000).
- [3] M. Yamaguchi, K. H. Kim, and S. Ikedaa, *J. Magn. Magn. Mater.* **304**, 208 (2006).
- [4] D. Y. Kim, S. S. Yoon, B. P. Rao, C. G. Kim, K. H. Kim, and M. Takahashi, *IEEE Trans. Magn.* **44**, 3115 (2008).
- [5] N. D. Ha, M. H. Phan, and C. O. Kim, *Nanotechnology* **18**, 155705 (2007).
- [6] 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).
- [7] S. J. Han, L. Xu, R. J. Wilson, and S. X. Wang, *IEEE Trans. Magn.* **42**, 3560 (2006).
- [8] L. Ejsing, M. F. Hansen, A. K. Menon, H. A. Ferreira, D. L. Graham, and P. P. Freitas, *J. Magn. Magn. Mater.* **293**, 667 (2005).
- [9] S. S. Yoon, D. Y. Kim, J. H. Lee, S. J. Kim, and C. G. Kim, *J. Korean. Magn. Soc.* **29**, 166 (2019).
- [10] T. McGuire and R. Potter, *IEEE Trans. Magn.* **11**, 1018 (1975).
- [11] E. van de Riet and F. Roozeboom, *J. Appl. Phys.* **81**, 350 (1997).