

Analysis of Thermal Exposure Characteristics and Performance of PHMR Sensors Based on Exchange Bias Induction Methods

Changyeop Jeon

Department of Bionic Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Republic of Korea

Jinwoo Kim, Mijin Kim, Sunghee Yang, and CheolGi Kim*

Department of Physics and Chemistry, DGIST, Daegu 42988, Republic of Korea

(Received 12 March 2025, Received in final form 10 April 2025, Accepted 10 April 2025)

Planar Hall Magnetoresistance (PHMR) sensors are widely used in industrial applications due to their low offset voltage and linear magnetic field response. However, their magnetic properties and reliability can degrade under high-temperature conditions. This study investigates the variation of exchange bias in PHMR sensors under thermal exposure and annealing. Two exchange bias induction methods were compared: magnetic field application during sputtering and annealing above the blocking temperature. Results show that exchange bias decreases with rising temperature, especially above the blocking point, while optimized annealing conditions can maintain its stability. These findings offer guidance for enhancing the thermal reliability of PHMR sensors in harsh environments.

Keywords : PHMR sensor, Exchange bias, Thermal exposure, Annealing, Magnetoresistance sensor

교환 이방성 유도 방법에 따른 PHMR 센서의 열 노출 특성 및 성능 분석

전창엽

한국기계연구원 바이오기계연구실, 대전광역시 가정북로 156, 34103

김진우 · 김미진 · 양승희 · 김철기*

DGIST 화학물리학과, 대구광역시 테크노중앙대로 333, 42988

(2025년 3월 12일 받음, 2025년 4월 10일 최종수정본 받음, 2025년 4월 10일 게재확정)

Planar Hall Magnetoresistance(PHMR) 센서는 낮은 오프셋 전압, 선형적인 자기장 응답, 높은 감도로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 그러나 고온 환경에서는 자기적 특성이 변하면서 성능 저하 및 신뢰성 감소가 발생할 수 있으며, 특히 교환 바이어스의 변화가 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 열적 노출 및 어닐링 공정이 PHMR 센서의 교환 바이어스에 미치는 영향을 두 가지 유도 방식(스퍼터링 중 자기장 인가 vs. 후열처리)을 통해 비교 분석하였다. 실험 결과, 교환 바이어스는 온도 상승에 따라 점차 감소하고, 블로킹 온도 이상에서는 급격히 악화되는 것으로 나타났다. 그러나 어닐링 조건을 최적화하면 교환 바이어스를 안정적으로 유지할 수 있었으며, 이를 통해 고온 환경에서도 센서의 성능과 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 이 결과는 PHMR 센서의 제조 및 공정 최적화에 중요한 지침이 될 수 있으며, 고온 환경에서 장기적 신뢰성이 요구되는 응용에 기여할 수 있다.

주제어 : PHMR 센서, 교환 이방성, 열 노출, 열처리, 자기 저항 센서

I. 서 론

자기 저항 센서는 산업, 의료, 로봇 등 다양한 분야에서 필수적인 역할을 수행하며, 다양한 환경에서 높은 감도와 안정성이 요구된다[1-3]. 또한, 다른 전자 장치 및 부품과의 통합이 용이하여, 응용 분야에 맞는 설계가 가능하다[4-6]. 기존의 자기 저항 센서는 감지 원리에 따라 이방성 자기 저항(Anisotropic Magnetoresistance, AMR), 평면 홀 자기 저항(Planar Hall Magnetoresistance, PHMR), 거대 자기 저항(Giant Magnetoresistance, GMR), 그리고 터널링 자기 저항(Tunneling Magnetoresistance, TMR) 센서로 분류된다[7-11]. 이 중 PHMR 센서는 제작이 용이하며 노이즈 특성이 우수하여 다양한 응용 분야에서 주목받고 있다.

교환 이방성(Exchange Bias)을 기반으로 하는 PHMR 센서는 자기장에 대해 선형적인 응답을 보이며, 낮은 오프셋 전압을 가지며, 센서의 구조 및 구동 모드에 따라 자기장 동작 범위와 민감도를 조정하기 용이하여 높은 활용성을 갖는다[12-14]. 이러한 특성은 고감도 자기 센서가 요구되는 분야에서 중요한 이점을 제공하지만, 자동차와 같은 실제 산업 환경에서는 센서가 고온의 환경에 노출될 가능성이 높으며, 이에 따라 센서의 자기적 특성과 오프셋 전압이 변화할 수 있다[15-17]. 따라서, 열 노출로 인한 자기 센서의 자기적 특성 변화가 센서의 성능에 미치는 영향에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 PHMR 센서의 교환 이방성 유도 방식에 따른 열적 안정성을 비교 분석하고, 보다 신뢰성 높은 센서 설계를 위한 최적의 공정 조건을 제시하고자 한다. 이를 위해 박막 증착 중 자기장을 인가하여 형성된 교환 이방성과 센서를 가열하여 자기장을 인가하는 자기 열처리를 수행하여 형성된 교환 이방성을 비교하였다. 두 방식이 센서의 자기적 특성과 열 충격 환경에서의 안정성에 미치는 영향을 분석함으로써, 보다 신뢰성 높은 자기 저항 센서 제작을 위한 최적의 공정 조건을 도출하고자 한다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 열 노출이 교환 이방성 기반의 자기 저항 센서의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 이중층 구조를 갖는 PHMR 센서를 제작하였다. 센서는 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 크기의 멀티링 구조로 설계되었으며, 제작 공정은 UV 리소그래피 및 리프트 오프 공정을 이용하여 진행되었다. Si/SiO₂(500 nm) 기판 위에 센서 패턴을 형성한 후, DC 마그네톤 스퍼터링 공정을 통해 Ta(5 nm)/NiFe(20 nm, 25 nm)/IrMn(10 nm)/Ta(5 nm) 순서로 박막을 증착하였다. 스퍼터링 공정은 기초 압력 1×10^{-7} Torr에서 수행되었으며, 증착 과정

은 Ar 분위기(3×10^{-3} Torr)에서 진행되었다.

센서의 교환 이방성을 유도하기 위해 두 가지 방법을 적용하고 비교하였다. 첫 번째 방법은 자기장 인가 증착법으로, 박막 증착 과정에서 25 mT의 자기장을 인가하여 교환 이방성을 유도하였다. 두 번째 방법은 자기 열처리로, 제작된 센서를 200 mT의 자기장을 인가한 상태에서 적절한 온도로 4 시간 동안 가열하여 상온으로 냉각하였다.

전류 인가 및 전압 측정을 위해 센서의 상단에 전극을 형성하였다. 전극 제작은 UV 리소그래피 및 리프트 오프 공정을 통해 진행되었으며, 이후 스퍼터링 공정을 이용하여 Ta(5 nm)/Au(100 nm) 구조의 전극을 증착하였다. 센서의 전기적 특성을 평가하기 위해 헬름홀츠 코일을 이용하여 자기장을 인가하였으며, 측정 시스템은 LabVIEW 기반 제어 소프트웨어를 사용하여 구성하였다. 전류 인가는 Keithley 2400 Sourcemeter(USA)를 사용하여 x축 방향으로 진행하였으며, 센서의 출력 신호는 HP 34401A Multimeter(USA)를 사용하여 y축 방향에서 측정하였다.

PHMR 센서의 열 충격 특성을 평가하기 위해 다양한 온도 조건에서 센서를 노출한 후 자기적 특성 변화를 분석하였다. PHMR 센서는 오븐에서 일정 시간 동안 열에 노출되었으며, 노출 온도는 센서 제작 공정에서 사용된 Soft Backing 온도인 120 °C부터 최대 300 °C까지 설정하였다. 열 노출 후 센서의 특성 변화를 평가하기 위해 PHMR 센서의 자기 응답 곡선을 분석하여 열충격이 센서의 감도 및 자기 저항 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 진동형 시료 자력계(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)를 이용하여 자기 이력 곡선 변화를 측정함으로써, 열 노출에 따른 교환 이방성의 변화를 비교 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. PHMR 센서의 교환 바이어스 유도

PHMR 센서는 AMR 센서와 유사하게, 강자성층 내 자화 방향과 센서에 인가된 전류 방향의 각도에 따라 센서 출력 신호가 변화하는 원리를 가진다. 전류 인가 방향과 전압 측정 방향이 동일한 AMR 센서와 달리, PHMR 센서는 두 방향이 수직이다. Fig. 1(a)와 같이 멀티링 형태로 제작된 PHMR 센서에서 x축 방향으로 전류를 인가하고, y축 방향으로 자기장에 의해 변화한 신호를 측정하였으며, 이 경우 센서의 출력 신호는 다음과 같다[18]:

$$V_y = \frac{1}{2} \frac{r}{wt} \Delta \rho \sin 2\phi I_x \quad (1)$$

여기서 r , w 및 t 는 반지름, 너비 및 강자성체층의 두께이며,

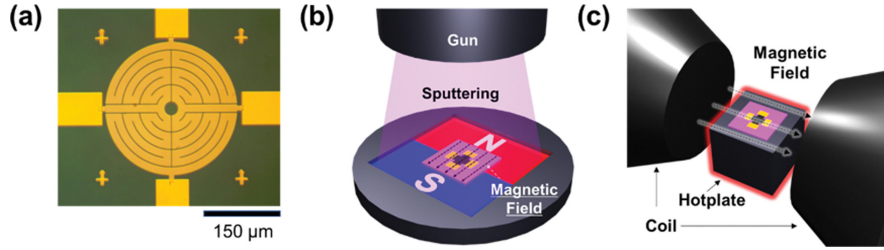


Fig. 1. (Color online) Illustration of the Exchange Bias induction methods for the PHMR sensor: (a) Microscope image of the PHMR sensor, (b) Schematic representation of the Exchange Bias induction method by applying a magnetic field during the sputtering process, and (c) Exchange Bias induction through a post-fabrication magnetic annealing process.

$\Delta\rho$ 는 이방성 저항률의 차이이고 ϕ 는 자화 방향과 전류 방향 사이의 각도이다.

외부 자기장에 대한 PHMR 센서의 선형적인 응답을 위해 교환 이방성이 유도되어야 한다. Fig. 1(b)는 센서의 박막 증착 과정에서 자기장을 인가하여 교환 이방성을 형성하는 방법이다. 이 방법에서 DC 마그네트론 스퍼터링 공정을 수행하는 동안 샘플 홀더에 배치된 자석을 통해 자기장을 인가하여 반강자성층과 강자성층 사이의 교환 이방성을 유도한다.

또한 Fig. 1(c)는 자기장을 인가한 상태에서 가열하여 교환 이방성의 방향과 세기를 조정하는 자기 열처리 방법을 나타낸다. 이 방법은 초기 박막 증착 직후 교환 이방성에 형성되지 않거나 열적 안정성을 개선할 경우 활용될 수 있다. 센서를 특정 온도로 가열한 후 강한 자기장을 인가함으로써 교환 이방성을 재정렬하고, 보다 안정적인 자기적 특성을 확보하는 것을 목표로 한다.

2. 스퍼터링 공정 중 유도된 교환 이방성의 열적 특성 분석

PHMR 센서의 제작 과정에서 유도된 교환 이방성의 열적 안정성을 평가하기 위해 다양한 온도 조건에서 센서를 열에 노출시키고 자기적 특성 변화를 분석하였다. Fig. 2(a)와 같이 핫플레이트를 이용해 120 °C부터 200 °C까지, 블록킹 온도 미만의 범위에서 센서를 가열하였으며, 일정 시간 동안 해당 온도를 유지하면서 열 노출 실험을 수행하였다.

Fig. 2(b)는 이중층 구조를 갖는 PHMR 센서에서 교환 이방성이 형성된 경우의 자화 용이축 방향 자기 이력 곡선을 나타낸다. 특히, Soft Baking 온도인 120 °C 이상에서 온도가 증가할수록 교환 바이어스가 점진적으로 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 고온 환경에서 교환 이방성이 서서히 변경됨을 시사하며, 센서의 자기적 안정성이 저하될 가능성을 보여준다.

또한, Fig. 2(c)는 자화 곤란축 방향에서의 자기 이력 곡선을 나타내며, 교환 이방성이 감소함에 따라 센서의 자화율이 낮아지는 경향을 보인다. 이는 교환 이방성이 감소할수록 센

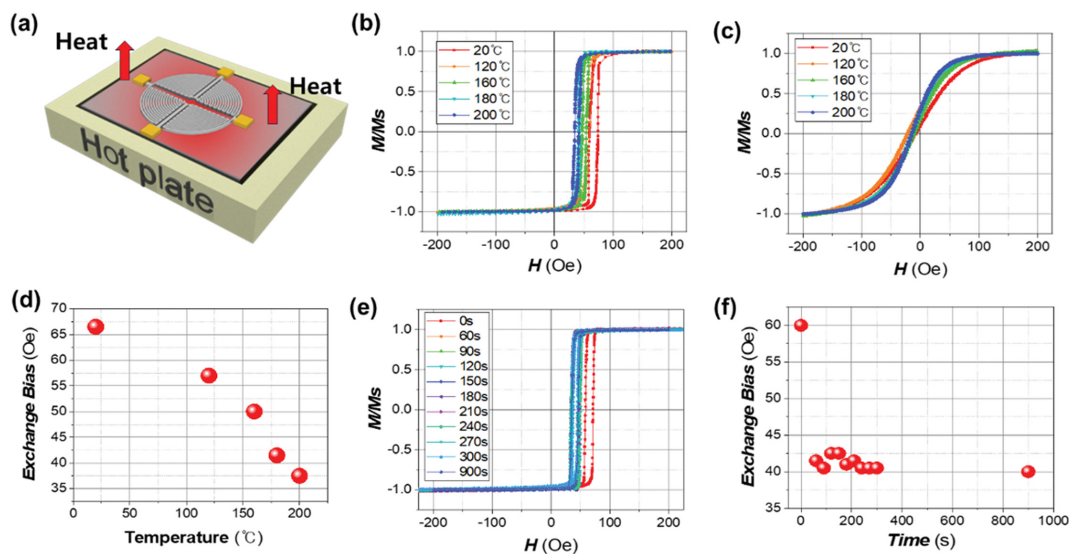


Fig. 2. (Color online) Thermal stability test of the Exchange Bias in the PHMR sensor: (a) Schematic of the thermal exposure setup using a hot plate, (b) Easy-axis and (c) hard-axis magnetic hysteresis loops at different temperatures, (d) Reduction of exchange anisotropy with temperature, (e) Hysteresis loop changes over time at 160 °C, and (f) Exchange anisotropy variation with exposure time.

서의 내부 자화가 외부 자기장 변화에 대한 반응성이 줄어들기 때문이며, 결과적으로 센서의 자기적 응답이 더욱 민감하게 변화하는 현상을 초래할 수 있다.

추가적으로, 일정한 온도(160 °C)에서 시간에 따른 교환 바이어스 변화를 분석하기 위해 자기 이력 곡선을 측정하였다. Fig. 2(e)는 60초에서 900초까지 서로 다른 시간 동안 열에 노출된 센서의 자화 용이축 방향 자기 이력 곡선을 나타낸다. 이를 통해, PHMR 센서는 열에 단시간 노출되더라도 교환 이방성이 급격히 바뀔 수 있음을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 2(f)에서 볼 수 있듯이, 동일한 온도 조건에서 열 노출 시간이 증가하여도 일정 시간 이후에는 교환 이방성이 더 이상 크게 변화하지 않는 경향을 보인다. 이는 교환 이방성의 변형이 주로 특정 온도 이상에서 발생하며, 시간보다는 온도의 크기에 의해 더 큰 영향을 받는다는 점을 시사한다.

PHMR 센서의 교환 이방성이 블로킹 온도 영역에서 어떻게 변화하는지를 분석하기 위해, 센서를 200 °C 이상의 온도에 노출한 후 자기 이력 곡선 변화를 측정하였다. Fig. 3(a)는 서로 다른 온도(200~300 °C)에서 열에 노출된 PHMR 센서의 자화 용이축 방향 자기 이력 곡선을 나타낸다.

측정 결과, 블로킹 온도 이상에서 센서를 가열할 경우 교환 이방성이 감소하며, 특정 온도 이상에서는 급격히 분리되는 현상이 관찰되었다. 특히, 240 °C 이상에서는 자기 이력 곡선이 여러 단계로 나누어지는 양상을 보이며, 이는 교환 이방성의 부분적인 손실 또는 재정렬이 발생할 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 높은 온도에서 반강자성층과 강자성층 사이의 교환 결합이 약해지면서 다중 도메인 구조가 형성될 가능성이 있음을 의미한다.

또한, Fig. 3(b)는 200 °C에서 열 노출된 PHMR 센서의 자기 응답 곡선을 나타낸다. 측정된 자기 응답 곡선에서, 열 노출 시간에 따라 0 Oe의 자기장 크기에서 센서의 신호 민감도가 50 $\mu\text{V}/\text{Oe}$ 에서 31 $\mu\text{V}/\text{Oe}$ 로 40% 감소하는 것이 확인되었다. 이는 센서의 교환 이방성이 감소함에 따라 내부 자화 구조가 변화하고, 이로 인해 센서의 감도 및 응답 특성이 달라질 수 있음을 보여준다.

3. 열처리를 이용한 교환 이방성의 열적 특성 분석

PHMR 센서의 교환 이방성은 열 노출에 의해 손실될 수 있으나, 열처리 공정을 적용함으로써 안정성을 향상시킬 수

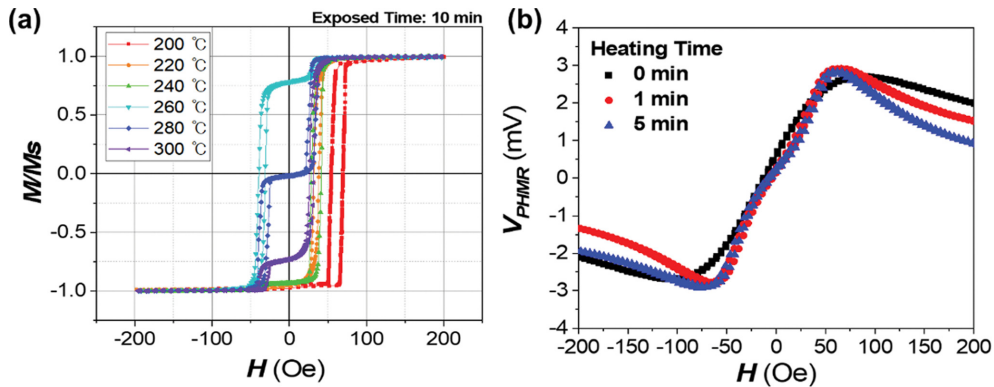


Fig. 3. (Color online) Thermal exposure effects on the magnetic response of the PHMR sensor: (a) Variation in the easy-axis magnetic hysteresis loops after exposure to temperature above the blocking temperature, and (b) Changes in the magnetic field response of the PHMR sensor with different exposure time at 200 °C.

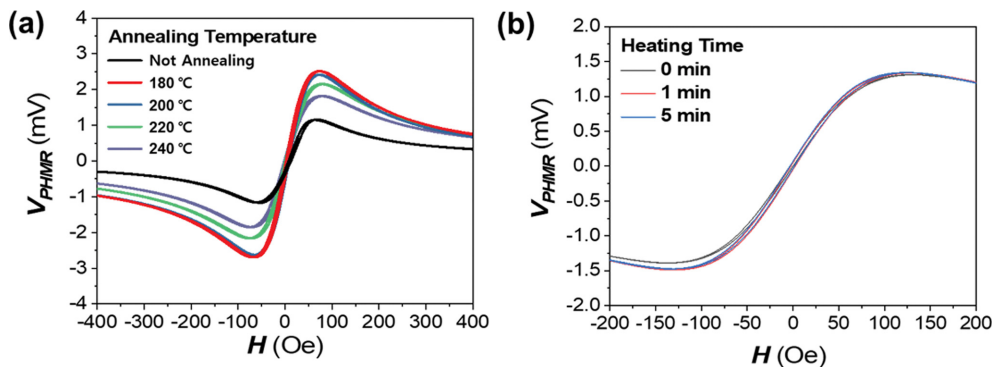


Fig. 4. (Color online) Magnetic response of the PHMR sensor with exchange bias induced by the annealing process: (a) Magnetic field response of the PHMR sensor at different annealing temperature, and (b) Magnetic response variation with exposure time at 200 °C for the annealed sensor.

있다. 이를 확인하기 위해 다양한 열처리 온도에서 PHMR 센서를 처리한 후, 자기장 응답 특성을 분석하였다.

Fig. 4(a)는 서로 다른 열처리 온도(180~260 °C)에서 열처리를 수행한 PHMR 센서의 자기장 응답 곡선을 나타낸다. 측정 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 신호 크기가 2 mV에서 5 mV로 약 2배 증가 후 감소하는 경향을 확인되었다. 이는 열처리 중 노출되는 온도의 크기에 따라 센서의 출력 성능이 결정됨을 의미한다. 따라서 최적의 열처리 온도를 설정하는 것이 센서의 성능을 향상시키는 데 중요한 요소가 될 수 있다.

또한, Fig. 4(b)는 200 °C에서 열 노출된 PHMR 센서의 자기장 응답 곡선을 나타내며, 일정 시간 동안의 열 노출 후에도 센서의 선형성이 유지됨을 보여준다. 이는 열처리를 적용할 경우, 기존의 열 노출로 인한 교환 이방성 손실을 완화할 수 있으며, 센서의 신뢰성을 유지하는 데 효과적일 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 연구 결과는 열처리 공정이 PHMR 센서의 내열성을 향상시키는데 중요한 방법이 될 수 있으며, 고온 환경에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있도록 공정 최적화를 수행할 필요가 있음을 시사한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 PHMR 센서의 교환 결합 바이어스의 열적 안정성을 조사하고, 열 노출이 센서의 자기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 스퍼터링 공정 중 자기장을 인가하는 방법과, 센서 제작 후 자기장을 인가한 상태에서 열처리를 수행하는 방법을 비교하였다. 실험 결과, 교환 결합 바이어스의 유도 방법에 따라 노출되는 온도에 대한 열적 안정성이 다르게 나타났다.

특히, 스퍼터링 공정을 통해 유도된 교환 결합 이방성의 경우, 열 노출 온도가 증가할수록 교환 결합 이방성이 감소하는 경향을 보였으며, 블로킹 온도(Blocking Temperature) 이상의 온도에서는 자기 이력 곡선이 변형되면서 센서의 자기적 선형성이 저하됨을 확인하였다. 또한, 일정 시간 이상 고온의 환경에 노출될 경우 교환 이방성이 더욱 빠르게 감소하는 특징을 나타냈다.

이러한 문제를 완화하기 위해 자기장을 인가한 상태에서 센서를 열처리 공정을 적용하였으며, 실험 결과 240 °C에서의 열처리를 통해 교환 결합 바이어스를 효과적으로 유지할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해, 열처리 공정을 활용하면 자기 센서의 열적 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 산업 전반에서 고온 환경에서도 안정적으로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

감사의 글

이 연구 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2023-00236809).

References

- [1] K. D. Hong, *J. Mag.* **1**, 111 (1996).
- [1] S. Oh, Y. Jung, S. Kim, S. Kim, X. Hu, H. Lim, and C. Kim, *Sci. Rep.* **7**, 16963 (2017).
- [2] G. Rizzi, F. W. Østerberg, M. Dufva, and M. F. Hansen, *Bio-sensors and Bioelectronics*. **52**, 445 (2014).
- [3] D. Miklusis, V. Markevicius, D. Navikas, M. Ambraziunas, M. Cepenas, A. Valinevicius, M. Zily, K. Okarma, I. Cuinas, and D. Andriukaitis, *Sensors*. **22**, 8269 (2022).
- [4] S. Mostufa, P. Yari, B. Rezaei, K. Xu, and K. Wu, *ACS Appl. Nano Mater.* **6**, 13732 (2023).
- [5] M. Kim, K. Kim, C. Jeon, S. Kim, B.-Y. Lee, M.-W. Lee, T. Jeon, J. Choi, H. Kim, H. Lim, B. Lim, S. Lee, S. Oh, and C.-G. Kim, *Appl. Mater. Today*. **36**, 102076 (2024).
- [6] C. Becker, B. Bao, D. D. Karnaushenko, V. K. Bandari, B. Rivkin, Z. Li, M. Faghih, D. Karnaushenko, and O. G. Schmidt, *Nat. Commun.* **13**, 2121 (2022).
- [7] P. Sreevidya, U. P. Borole, R. Kadam, J. Khan, H. C. Barshilia, and P. Chowdhury, *Sensors and Actuators A: Phys.* **324**, 112573 (2021).
- [8] C. Jeon, M. Kim, J. Kim, S. Yang, E. Choi, and B. Lim, *Sensors*. **25**, 1235 (2025).
- [9] U. P. Borole, S. Subramaniam, I. R. Kulkarni, P. Saravanan, H. C. Barshilia, and P. Chowdhury, *Sensors and Actuators A: Phys.* **280**, 125 (2018).
- [10] K. Wang, B. Li, L. Wang, J. Wang, C. Li, Z. Ding, and H. Shao, *Sensors*. **24**, 6071 (2024).
- [11] V. Venugopal, G. Wu, S. Stokes, and H. Yin, *IEEE Trans. Magn.* **51**, 1 (2015).
- [12] J. Lee, C. Jeon, T. Jeon, P. T. Das, Y. Lee, B. Lim, and C. Kim, *Sensors*. **21**, 3585 (2021).
- [13] B. Sinha, T. Q. Hung, T. S. Ramulu, S. Oh, K. Kim, D.-Y. Kim, F. Terki, and C. Kim, *J. Appl. Phys.* **113**, 063903 (2013).
- [14] N. T. Thanh, L. T. Tu, N. D. Ha, C. O. Kim, C. Kim, K. H. Shin, and B. P. Rao, *J. Appl. Phys.* **101**, 053702 (2007).
- [15] T. Jeon, J.H. Lee, A. Talantsev, and C. G. Kim, *IEEE Magn. Lett.* **10**, 1 (2019).
- [16] X. Shan, Y. Huang, H. Ren, R. Zhu, H. Zhang, C. Feng, and G. Yu, *AIP Adv.* **13**, 105312 (2023).
- [17] Y. Q. Zhang, X. Z. Ruan, B. Liu, Z. Y. Xu, Q. Y. Xu, J. D. Shen, Q. Li, J. Wang, B. You, H. Q. Tu, Y. Gao, W. Zhang, Y. B. Xu, and J. Du, *Appl. Surf. Sci.* **367**, 418 (2016).
- [18] B. Lim, M. Mahfoud, P. T. Das, T. Jeon, C. Jeon, M. Kim, T.-K. Nguyen, Q.-H. Tran, F. Terki, and C. Kim, *APL Mater.* **10**, 051108 (2022).