

Vibrating Sample Magnetometer Using Unimorph Piezoelectric Actuator

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungsoong University, 110-1 Daeyeon-dong, Nam-gu, Busan 48434, Korea

(Received 19 August 2019, Received in final form 27 August 2019, Accepted 28 August 2019)

A vibrating sample magnetometer with a unimorph piezoelectric actuator as vibrating mechanism is proposed in this paper. By adopting a piezoelectric vibrating mechanism, we could achieve both high sensitivity and small-sizing of VSM. To enhance the sensitivity, the optimal vibrating frequency was investigated by a set of FEM structural analysis. When an alternating voltage was applied to the unimorph piezoelectric actuator, the acryl cantilever is vibrated transversely. At the end of the cantilever, on which a magnetic specimen was attached, the maximum vibration amplitude was ~ 1.6 mm at 160 Hz. The proposed VSM showed high resolution $\sim 2 \times 10^{-5}$ emu due to an extremely large vibrating amplitude, even if it has an extremely small size ($30 \times 25 \times 25$ cm³) compare with conventional VSMs.

Keywords : piezoelectric unimorph actuator, vibrating sample magnetometer, small-sizing

압전 유니몰프 진동자를 이용한 진동형 시료 자력계

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 48434

(2019년 8월 19일 받음, 2019년 8월 27일 최종수정본 받음, 2019년 8월 28일 게재확정)

본 연구에서는 압전 유니몰프 액츄에이터의 진동을 이용하는 진동형시료자력계를 제안한다. 압전 세라믹의 진동을 이용함으로써 진동형시료자력계의 높은 감도와 소형화를 동시에 얻을 수 있었다. 측정 감도를 높이기 위해서, FEM 구조 해석을 통하여 최적의 주파수를 확인하였다. 교류 전압을 압전체에 인가하였을 때 아크릴로 구성된 캔티레버가 진동하며, 캔티레버의 끝부분에 장착되는 시료에 균일한 진동을 인가할 수 있었다. 감도에 직접적으로 영향을 미치는 최대 진동폭은 160 Hz에서 ~ 1.6 mm이었다. 제안된 진동형시료자력계는, 기존의 장치에 비하여 매우 작은 크기임에서 불구하고($30 \times 25 \times 25$ cm³), 큰 진동폭에 의해서 $\sim 2 \times 10^{-5}$ emu의 우수한 측정 분해능을 보였다.

주제어 : 압전 유니몰프 액츄에이터, 진동형시료자력계, 소형화

I. 서 론

진동형시료자력계(Vibrating Sample Magnetometer; VSM)는 높은 정확도와 감도로 다양한 자성재료와 자기디바이스의 특성과 성능을 측정할 수 있기 때문에 표준적인 자성 측정 장치로 널리 사용되고 있다[1,2]. 기본적으로 VSM을 이용하여 벌크, 와이어, 리본, 박막, 분말 등 다양한 형태를 가지는 자성재료의 자화곡선(Magnetization curve)를 측정할 수 있으며, 측정된 자화곡선으로부터 시료의 투자율, 보자력, 포화자

화, 잔류자화 등의 특성을 분석할 수 있다. 더욱이, VSM을 이용하면 표준시료를 이용한 간단한 보정만으로 자화(Magnetization)의 절대값을 높은 정밀도로 측정할 수 있다는 장점이 있다. VSM을 이용할 때 시료로부터 발생하는 자속을 측정하기 위한 센서로 일반적으로 코일을 사용하기 때문에, 코일의 공진주파수보다 충분히 낮은 주파수로 동작한다면, VSM의 감도는 기하학적인 형상과 신호처리회로는 물론 기계적인 진동주파수 f 와 진동폭 A 에 비례한다[3]. 일반적인 VSM의 경우, 진동주파수는 수십 Hz이고 진동폭은 수백 μ m이며, 측정감도에 비례하는 진동폭과 진동주파수의 곱($A \times f$)은 수 10 mm·Hz이다.

본 연구그룹에서는 이전 연구 결과의 적층형 압전 세라믹

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-51-663-5152,

Fax: +82-51-625-1402, e-mail: khshin@ks.ac.kr

을 이용하여 시편을 진동시키는 VSM을 개발하였다[3]. 적층형 압전 세라믹의 경우[4], 단위 체적당 큰 기계적 에너지를 발생시킬 수 있기 때문에 안정된 진동이 가능하였으나, 적층형 압전 세라믹의 가격이 비싸고, 진동 중 수직 방향으로 충격이 가해졌을 때 쉽게 파손될 수 있다는 단점이 있었다.

본 연구에서는 새로운 진동기구를 적용한 VSM을 개발하고자 한다. 본 연구를 통해서 압전세라믹판을 탄성판에 부착하여 제작한 유니몰프[5]를 시편을 진동시키는 기구로 사용하는 VSM을 개발하면, 높은 주파수에서 큰 진동폭으로 구동할 수 있기 때문에, 소형이면서 높은 감도와 분해능으로 시편의 자기적 특성을 측정할 수 있다.

II. 실험 방법

본 연구에서 제안하는 VSM은 압전 유니몰프 액츄에이터 (Piezoelectric Unimorph Actuator; PUA)를 진동기구로 활용하는 새로운 타입의 장치이다. Fig. 1(a)는 본 연구에서 제안하는 VSM의 구성도를 나타낸 것이다. 시료는 탄성적으로 고정된 PUA의 끝부분에 장착된다. PUA는 길이 100 mm, 두께 5 mm, 폭 10 mm의 아크릴 빔에, 길이 20 mm, 폭 10 mm,

두께 0.5 mm의 PZT (NEPEC-21, NEC-Tokin)를 전도성 에폭시를 이용 접착하여서 제작하였다. PUA에 바이폴러전원 (BP4610, NF Co.)을 이용하여 교류전압을 인가하였다. 바이폴러전원(HSA4101 NR Co.)과 헬름홀츠코일을 이용하여서 시료에 ± 100 Oe의 자계를 인가하였다. 검출코일의 외경 15 mm, 두께 3 mm, 5000 턴의 공심코일 두개를 이용하였다. 검출코일에서 측정된 신호는 Lock-in 증폭기(SR810)를 이용하여서 동기검파하였다. Fig. 1(b)는 측정장치 중에서 진동과 관련된 부분의 개념도를 나타낸다.

PUA 혹은 시편의 변위(진동)는 위치검출센서(Position Sensing Detector; PSD)와 레이저다이오드를 이용하여서 측정하였다. 레이저다이오드에서 방사되어서 PUA의 표면에서 반사한 빛을 PSD를 이용하여서 측정함으로써 PSD 혹은 시편의 변위(진동)를 측정하였다. 기계적인 진동을 측정하는 것은 매우 중요하다. 캔티레버형태로 고정된 PSU에 외적인 요인에 의해서 변위가 달라지면 시편으로부터 발생해서 검출코일에 쇄교하는 자속의 크기에 영향을 미치게 된다. 이는 신호의 왜곡을 의미한다. 본 연구에서는 시편의 진동크기를 실시간으로 측정하여 데이터를 보정하였다. 검출코일은 시편의 수직위치를 기준으로 상하 하나씩 설치하여 차동으로 신호가 검출되도록 결선하였다.

제작된 VSM은 기존의 장치들에 비해서 매우 작고 가볍다. 기존의 VSM에서는 진동을 발생시키기 위해서, 자기력을 이용한다. 충분한 힘을 발생시키기 위해서 장치가 크고 무겁게 제작되어야 할 뿐 아니라, 진동 발생장치로부터 발생하는 자계가 시편에 영향을 미치지 않도록 하기 위해서 장치의 크기가 커질 수 밖에 없다. 본 연구에서 제안하는 VSM은, 자계 발생을 위한 헬름홀츠코일과 전원장치를 제외하면, 매우 작은 크기($\approx 15 \times 10 \times 8$ cm)와 무게(≈ 0.7 kg)를 가진다. 본 연구에서는 자계 발생을 위해서 무게 3.5 kg, 300 턴의 헬름홀츠코일을 사용하였다.

본 연구에서 제안하는 VSM의 또 하나의 장점은 시료진동을 위해서 매우 작은 전력을 소비한다는 것이다. 예를 들어, 진동을 발생시키기 위해서 100 V의 전압을 940 Hz로 인가하는 경우 흐르는 전류는 ~ 10 mA 정도였다. 따라서, 소비되는 전력은 ~ 1 W였다.

III. 실험 결과

일반적으로 VSM의 검출코일로부터 얻어지는 출력전압은 패러데이법칙을 이용하여 해석할 수 있다[6]. Fig. 2는 시편의 자화(\vec{M})과 코일의 배치를 나타낸다.

PUA에 교류 전압이 인가될 때 자화는 A의 진동폭으로 상하운동을 하면 코일 면에서의 자기포텐셜은,

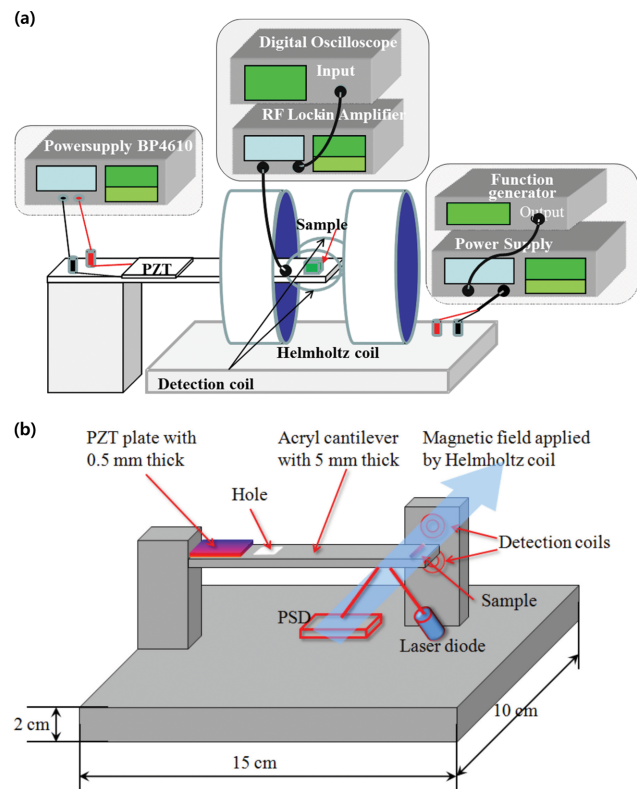


Fig. 1. (Color online) (a) Configuration of the proposed VSM with piezoelectric unimorph and (b) schematic view of piezoelectric unimorph and Helmholtz coil.

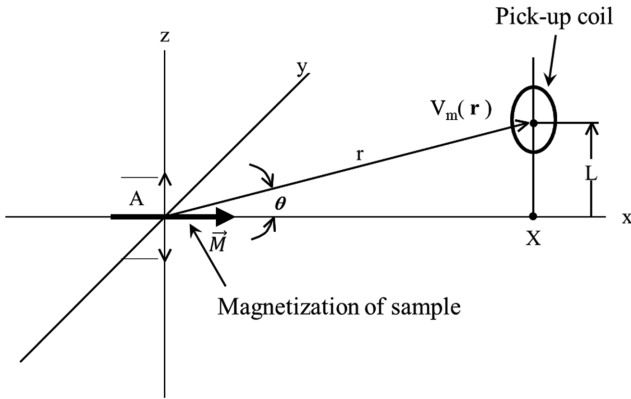


Fig. 2. Arrangement of pick-up coil and magnetization of sample.

$$V_m(r) = \frac{|\vec{M}_x|}{4\pi\mu_0 r^3} \cos\theta \quad (1)$$

로 나타낼 수 있고, 시편과 코일과의 거리 r 에 따라 변화한다는 것을 알 수 있다. 시편의 진동에 의한 검출코일에서 얻어지는 전압은 패러데이법칙에 의해서 나타나므로,

$$V = \mu_0 SN \frac{\partial}{\partial t} \nabla V_m(r) \quad (2)$$

여기서, S 는 자속이 쇄교하는 코일의 단면적, N 은 코일의 권선수를 나타낸다. 식(2)는 $\vec{H} = -\nabla V_m$ 의 관계를 이용하면,

$$V = -\mu_0 SN \frac{\partial}{\partial t} H_x \quad (3)$$

으로 표현할 수 있다. 즉, 코일면을 쇄교하는 자계의 시간변화에 비례하는 출력신호를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 정리하면, 식(1)과 (3)으로부터, 측정되는 전압의 크기는 시편의 진동폭 A 와 진동주파수(시간변화) f 에 비례한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 PUA의 끝부분, 즉 시편이 장착되는 부분의 변위를 주파수에 따라서 나타낸 것으로, FEM 구조해석을 이용하여서 계산된 것이다. FEM 구조해석을 위해서는 상용 FEM 툴(Ansys)를 이용하였고, 두께 방향으로 분극된 PZT에 인가되는 교류 전압은 1V로 하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, PUA는 160 Hz 부근과 940 Hz에서 기계적으로 공진한다. 이 때의 변위는 29 μm 와 48 μm 였다. 출력신호에 비례하는 Af 값을 계산하면 각각 4.64 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 와 45.12 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 였다. 전압을 인가하면 PZT는 두께방향으로 신축하고 탄성적으로 결합된 아크릴 캔틸레버가 굴곡운동을 한다. 사용한 PZT판(두께 0.5 mm)은 대략 750 V 정도의 전압에 의해서 포화된다. 그러나, 본 연구에서 사용한 바이폴러전원(BP4610)의 경우, 안전을 고려할 때 100 V 정도

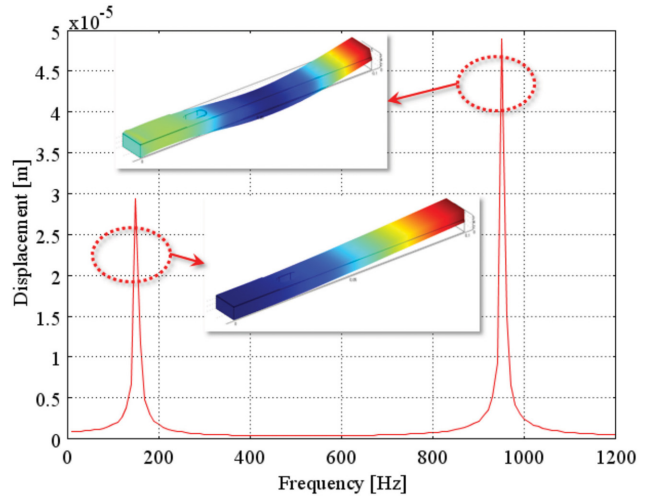


Fig. 3. (Color online) Frequency dependence of vibration amplitude of the end of piezo-unimorph.

까지의 전압을 발생시킬 수 있다. 100 V의 전압을 PZT에 인가한 경우, 3.07 mm(160 Hz)와 4.92 mm(940 Hz)의 변위를 얻을 수 있었다. 이 때 Af 값은 160 Hz일 때 491.2 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 와 940 Hz 일 때 4625 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 였다. 출력신호를 높여서 감도를 높이기 위해서는 당연히 높은 Af 값을 나타내는 조건으로 PUA를 작동시켜야 한다. 그러나, 인가전압과 주파수가 일정 이상으로 높아지면 PZT에 열이 발생하는 것을 발견하였다. 열이 발생하면 액츄에이터의 공진주파수가 변화하여 작동 조건이 바뀔 뿐 아니라, 심한 경우 파손될 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 장시간 작동에도 열적인 문제가 발생하지 않는, 충분히 안전한 조건으로 인가 전압 50 V, 진동주파수 160 Hz에서 실험을 진행하기로 하였다. 이 때, 진동폭은 1.6 mm이었다. 940 Hz에서 작동시키면 보다 높은 Af 값을 얻을 수 있었으나, 160 Hz에서 동작시킨 이유는, 940 Hz에서 진동시킨 경우 소음이 발생하여 실험하기 어려운 문제가 발생했기 때문이다. 그리고, 높은 전압과 주파수로 PUA의 PZT를 구동하는 경우, 보다 높은 감도를 얻기 위해서 실제로 발생하는 열을 측정하여 최적의 구동조건을 파악하는 것이 향후 연구를 위해서 필요하다. 기존의 상용 VSM의 경우, 일반적으로 80 Hz로 시편을 진동시키며 진동의 크기는 ~ 1 mm 정도로, Af 는 ~ 80 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 이다. 본 연구에서 개발한 VSM의 Af 값은, 구동 조건에 따라 다르지만, 160 Hz, 50 V의 조건으로 구동한 경우 257 $\text{mm}\cdot\text{Hz}$ 였으며, 이는 신호검출을 위한 모든 조건이 동일하다고 가정하면 기존의 VSM에 비해서 3배 정도 높은 감도를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 제작된 VSM을 이용하여 측정된 자화곡선의 한 예를 보여준다. 측정에 사용된 시편은 Co 계 아몰퍼스와이어 (CoFeSiB)[7]로, 직경 100 μm , 길이 5 mm였다. Fig. 4의 결

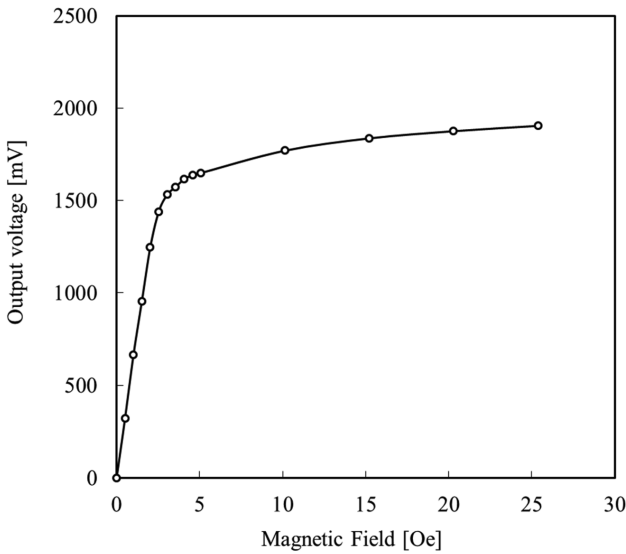


Fig. 4. Magnetic field dependence of output voltage from pick-up coil.

과는 검출코일에서 얻어진 전압을 10배 증폭하여 동기검파한 것이다. 측정에 사용한 아몰퍼스와이어의 포화자속밀도는 0.6 T(포화자화로서 $\approx 480 \text{ emu/cc}$)이었으며, 제작한 헬름홀츠 코일을 이용하여서 발생시킬 수 있는 최대 자계인 500 Oe를 인가하였을 때 검출코일로부터 발생한 전압은 $\sim 200 \text{ mV}$ (증폭하지 않았을 때)였다. 시편의 연자성을 고려할 때, 500 Oe의 자계에 의해서 시편은 거의 포화되었을 것으로 예상할 수 있으므로, 검출코일에 200 mV가 발생하였을 때 시편은 포화되어서 자화는 $\approx 480 \text{ emu/cc}$ 일 것으로 예상할 수 있다. 시편의 직류 상대투자율($\sim 5,000$)을 고려하면 대략 0.1 Oe의 자계에 의해서 포화되어야 한다. Fig. 4를 보면 2.5 Oe에서 출력전압은 1440 mV이었으며 자화값으로 환산하면 $\sim 346 \text{ emu/cc}$ 가 된다. 0~2.5 Oe 사이의 자계 영역에서 자화는 거의 선형적이므로, 인가된 자계와 자화값으로부터 상대투자율($\mu_r = 1 + \frac{\Delta M}{\Delta H}$)을 계산할 수 있으며, 계산된 상대투자율은 138이었다. 측정된 결과와 시편의 상대투자율 사이에 큰 차이가 나는 이유는 시편의 형상에 의한 반자계의 영향이다. 시편의 형상을 고려한 반자계 계수 N 을 $N^{-1} = 1 + 1.6 \frac{c}{a}$ 로 근사하면[8] 0.0062이었다. 반자계 계수를 고려한 시편의 겉보기 투자율은($\mu_{\text{apparent}} = 1 + \frac{\mu_r}{N\mu_0}$)로 계산할 수 있으며, 156이었다. 측정된 상대투자율(138)과 반자계계수를 고려하여 계산한 겉보기투자율(156)과 차이가 나는 주된 이유는 아몰퍼스과이어를 절단하였을 때 인가된 스트레스로 인해서 연자성이 열화되었기 때문으로 추측된다.

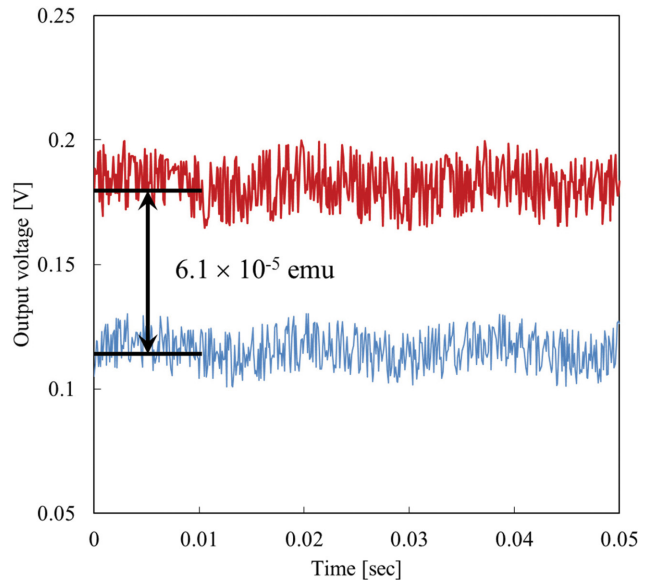


Fig. 5. (Color online) Difference of output signals measured with $6.1 \times 10^{-5} \text{ emu}$.

Fig. 5는 제작된 VSM의 분해능을 확인하기 위해서 인가 자계값을 미세하게 변화시켜서($< 0.1 \text{ Oe}$) 측정된 것이다. 분해능을 측정하기 위해서, 검출코일에서 얻어지는 신호를 100배 증폭하고 동기검파하였다. 아몰퍼스과이어의 길이(5 mm)와 직경(100 μm)를 고려하면 체적은 $3.93 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ 이다. 포화되었을 때 아몰퍼스과이어(시편)의 총 자기모멘트의 합은 포화자화(480 emu/cc)와 체적($3.93 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$)의 곱으로 구할 수 있으며 $1.885 \times 10^{-2} \text{ emu}$ 라는 것을 알 수 있다. 포화되었을 때, 즉 2000 mV의 출력전압이 얻어졌을 때 자기모멘트의 총 합으로부터, 제작된 VSM의 감도를 구할 수 있으며, 106 V/emu였다. Fig. 5에서 두 신호의 차이는 $\sim 65 \text{ mV}$ 였으며, 증폭(10배) 이전의 신호는 $\sim 6.5 \text{ mV}$ 라는 것을 알 수 있다. 제작된 VSM의 감도를 고려하면 Fig. 5에서 얻어진 신호는 $6.1 \times 10^{-5} \text{ emu}$ 의 자기모멘트 차이에 의한 것이라는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 결과에서 노이즈는 $\sim 20 \text{ mV}$ (증폭 이전 $\sim 2 \text{ mV}$)이므로, 제작된 VSM의 분해능은 $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ emu}$ 라는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

압전 유니몰프 액츄에이터의 진동을 이용하는 진동형시료 자력계를 제안하기 위해서 본 연구를 수행하였다. 측정 감도를 높이기 위해서, FEM 구조해석과 실험을 통하여 최적의 주파수를 확인하였다. 감도에 직접적으로 영향을 미치는 최대 진동폭은 160 Hz에서 $\sim 1.6 \text{ mm}$ 이었다. 제안된 진동형시료 자력계의 크기는 $30 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$ 이었고, $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ emu}$ 의 측

정 분해능을 보였다.

References

- [1] S. Foner, Rev. Sci. Instrum. **27**, 548 (1956).
- [2] S. Foner, J. Appl. Phys. **79**, 4740 (1996).
- [3] K. H. Shin, Phys. Stat. Sol., (b) **241**, 1633 (2004).
- [4] <https://content.kemet.com/>.
- [5] L.-H. Kang, J.-W. Lee, J.-H. Han, S.-J. Chung, and H.-Y. Ko, Smart Mater. Struct. **18**, 104007 (2009).
- [6] A. Niazi, P. Poddar, and A. K. Rastogi, CURRENT SCIENCE **79**, 99 (2000).
- [7] https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/products/amorphous_wire/index.html.
- [8] R. Prozorov and V. G. Kogan, Phys. Rev. Appl. **10**, 014030 (2018).