

압전 복합소재와 키리가미 섬유펠극을 적용한 스트레처블 에너지 하베스팅 소자

김보란¹, 현동열², 박귀일¹ 

¹ 경북대학교 신소재공학부 금속신소재공학전공

² 한국과학기술원 신소재공학과

Stretchable Energy Harvester Based on Piezoelectric Composites and Kirigami Electrodes

Boran Kim¹, Dong Yeol Hyeon², and Kwi-II Park¹

¹ Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

² Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

(Received June 28, 2023; Revised July 6, 2023; Accepted July 7, 2023)

Abstract: Stretchable piezoelectric energy harvester (S-PEHs) based on composite materials are considered one of the potential candidates for realizing wearable self-powered devices for smart clothing and electronic skin. However, low energy conversion performance and expensive stretchable electrodes are major bottlenecks hindering the development and application of S-PEHs. Here, we fabricated the S-PEH by adopting the piezoelectric composites with enhanced stress transfer properties and kirigami-patterned textile electrodes. The optimum contents of piezoelectric BaTiO₃ nanoparticles inside the carbon nanotube/ecoflex composite were selected as 30 wt% considering the trade-off between stretchability and energy harvesting performance of the device. The final S-PEH shows an output voltage and mechanical stability of ~5 V and ~3,000 cycles under repeated 150% of tensile strain, respectively. This work presents a cost-effective and scalable way to fabricate stretchable piezoelectric devices for self-powered wearable electronic systems.

Keywords: Piezoelectric, Composite, Stretchable, Energy harvesting, Textile electrode

최근 개인 맞춤형 헬스케어에 관한 관심이 급증함에 따라 이를 실현하기 위한 다양한 종류의 웨어러블(wearable) 센서 시스템의 개발이 가속화되고 있다 [1-6]. 웨어러블 센서는 유선으로 전력을 공급받는 기존의 장치들과 다르게 자체적인 전력원을 이용하여 작동할 수 있어야 하며, 사용

시 불편함을 느끼지 않도록 충분히 신축성이 있어야 한다 [7-11]. 비록 센서의 저전력화, 소형화와 함께 배터리 기술이 고도화됨에 따라 착용성과 작동시간이 개선되었지만, 여전히 24시간 이상의 연속적인 작동을 구현하기에는 불충분하여 잦은 충전이 요구되며, 이는 웨어러블 센서 활용의 일상화를 저해하는 요소이다 [12,13]. 이를 극복하기 위해, 열, 빛, 전자기파 등 다양한 에너지를 전기로 변환하는 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기반의 반영구적 소형 전력원을 도입하여 자가발전 센서 시스템을 구현하고자 하는 연구들이 이루어지고 있다 [6,14-16]. 이 중, 기계적 에너지를 이용하는 압전 기반의 유연한 에너지 하

✉ Kwi-II Park; kipark@knu.ac.kr

Boran Kim and Dong Yeol Hyeon equally contributed to this work.

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

베스터(piezoelectric energy harvesters, PEHs)는 인체에서 발생하는 에너지에 대한 접근성이 높을 뿐만 아니라, 소자의 구조가 간단하고 가벼우며 내구성이 우수하여 웨어러블 센서로의 통합에 적합하다고 여겨진다 [17,18].

유연한 압전 소자를 개발하기 위해 laser-lift-off, 전기방사, 스펀코팅 공정 등을 이용하여 제조된 압전 세라믹, 고분자 및 복합체 박막 소재가 다수 보고되었다 [19,20]. $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, BaTiO_3 , $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ 등을 포함하는 페로브스카이트(perovskite) 압전 세라믹은 높은 압전전하상수(piezoelectric charge coefficient, d_{ij})와 전기기계결합계수(electromechanical coupling coefficient, k)를 지니지만, 650°C 이상의 고온 열처리 공정이 요구되고 기계적 안정성이 낮기 때문에 대규모 생산과 웨어러블 소자로의 응용이 제한된다 [21-23]. 반면, polyvinylidene fluoride(PVDF)와 그 공중합체로 대표되는 압전 고분자는 완전히 유연하고 소자화 공정이 간단하지만 낮은 d_{ij} 와 k 로 인해 자가발전 센서 시스템의 구현에 있어서 성능이 불충분하다고 여겨진다 [24,25]. 뿐만 아니라, 기존의 유연한 세라믹 및 고분자 소재는 상대적으로 높은 탄성계수를 지니기 때문에 신축성이 요구되는 웨어러블 분야로의 활용에 부적합하다 [26-28].

이를 극복하기 위해, 최근에는 세라믹과 고분자의 특성을 동시에 지니는 복합소재를 이용하고자 하는 연구가 이루어지고 있다 [29-31]. 기계적·열적 안정성과 발전 성능 등 압전 복합체의 특성은 일반적으로 무기(inorganic) 분산재와 유기(organic) 기상재(matrix)의 조합으로 결정되며, 웨어러블 응용 분야에서는 우수한 생체적합성(biocompatibility)과 신축성(stretchability)이 주요 고려 사항이다 [32]. 이러한 측면에서 대부분의 신축성 압전 복합소재는 비납계(Pb-free) BaTiO_3 나노소재와 PDMS 또는 ecoflex 고분자를 혼합하여 제작되고 있다 [33-35]. 그러나 압전 복합체에서 발생하는 나노소재의 불균일한 분산과 비압전성 기상재로의 응력 흡수는 압전소자의 성능 저하를 야기하는 요소로 작용하며, 복합체 기반 PEH의 활용을 저해한다 [36].

한편, 기판과 전극 소재를 포함한 대부분의 기존 소자 구성요소는 인장응력에 취약하여 높은 신축성이 요구되는 분야로의 적용에 어려움이 있다 [23]. 이를 극복하기 위해 eutectic-GaN 액체금속을 신축성 기판에 패터하거나 pre-stretched PDMS 기판에 전도성 박막을 증착하여 주름을 형성하는 방법 등이 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 매우 고가의 전극 소재가 요구되고 대면적화 및 대량 생산화에 부적합하다는 한계가 있다 [37-39].

본 연구에서는 압전 세라믹 입자로의 응력 전달 특성이 향상된 $\text{BaTiO}_3/\text{carbon nanotubes (CNTs)}/\text{ecoflex}$ 복

합소재와 키리가미(kirigami) 패터된 신축성 섬유전극을 도입하여 단순·저비용 공정 기반의 신축성 PEHs (S-PEHs)를 구현하였다. 키리가미 구조는 PEH의 성능을 거의 손상시키지 않으며 재료의 신축성을 2~300%까지 향상시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다 [40,41]. 압전 복합체에 분산된 CNTs는 고분자 기상이 인장되었을 때 소재 내부에 형성되는 응력을 세라믹 입자에 효과적으로 전달하기 위해 첨가되었으며, 개발 복합체의 발전 성능과 신축성 사이의 균형을 고려하여 BaTiO_3 나노입자와 CNTs의 함량을 각각 30 wt%와 1 wt%로 최적화하였다 [42]. 키리가미 형상으로 패터된 섬유전극은 전극 자체의 신축성과 함께 각 세그먼트(segment)의 구조적 왜곡에 의해 약한 힘에도 쉽게 인장되었다. 또한, 소자 구성요소 사이의 탄성계수 차이로 인한 인장 시의 전기적 단락 및 기계적 파손을 방지하기 위해 구리 도선을 전도성 에폭시(epoxy)를 사용하지 않고 직조하여 섬유전극에 연결하였다. 최적화된 입자 함량의 S-PEH는 약 150%의 인장 변형 하에서 ~5 V의 전압 신호를 출력하였으며, 600 M Ω 의 외부 저항 하에서 최대 33.75 nW의 순간 전력(instantaneous power)을 생성하였다. 또한, 제작된 S-PEH의 출력 전압이 3,000회의 반복적인 변형 이후에도 일정하게 유지됨을 확인함으로써, 개발 소자가 우수한 내구성을 가짐을 입증하였다.

그림 1(a)는 본 연구에서 사용된 압전 복합소재와 섬유전극 기반의 S-PEH 제작 공정 개략도이다. BaTiO_3 압전 나노입자는 세라믹 분말의 대량 합성에 용이한 고온 확산 기반의 고상합성법을 이용하여 제조되었다. 볼밀(ball mill)을 이용하여 BaCO_3 (>99%, Sigma-Aldrich)와 TiO_2 (>99%, Sigma-Aldrich) 원료 분말을 충분히 혼합한 후, 975°C 에서 하소(calcination)하였다. 그 후, 하소된 분말을 3 mm 직경의 세라믹 bead를 이용하여 24시간 동안 볼밀하여 BaTiO_3 나노입자를 제조하였다.

$\text{BaTiO}_3/\text{CNTs}$ 혼합 분말은 에탄올 용액 내에 각각의 분말을 혼합하고, 가열교반기(hotplate stirrer)를 이용하여 80°C 에서 에탄올이 완전히 증발할 때까지 교반하여 제조하였다. 이때, 신축성 압전 복합소재의 최적화된 입자 함량을 확인하기 위해 각각의 분말을 다양한 비율($\text{BaTiO}_3:\text{CNTs}=10:1, 15:1, 20:1, 25:1$ 및 $30:1$ wt%)로 설정하였다. 충분히 건조된 혼합 분말은 100 μm 메시(mesh)의 체(sieve)를 이용하여 체질하였다.

압전 복합소재는 준비된 $\text{BaTiO}_3/\text{CNTs}$ 분말을 ecoflex 고분자에 다양한 질량비로 분산시켜 제작하였다. 분산재가 고분자 기상 내에 고르게 분산될 수 있도록 ecoflex (Smooth-On)의 주제(part A)와 분산재를 혼합한 후 오버헤드 교반기(overhead stirrer)를 이용하여 12시간 이상

교반하였다. 그 후, 경화제(part B)를 part A와 1:1 비율로 첨가하고, 데시케이터(desiccator) 내에서 기포를 제거하였다. 기포가 완전히 제거된 압전 복합체는 완전히 경화되기 전에 빠르게 두꺼운 PET 모기판(mother substrate)에 3,000 rpm으로 30초 동안 스핀코팅하고, 80°C의 대류 오븐(convection oven) 내에서 1시간 동안 충분히 경화하여 필름화하였다. S-PEH의 상·하부 전극은 3×4 cm² 크기의 전도성 섬유 전극(Soitex)을 각각 이용하였으며, 전극의 신축성을 향상시키기 위해 일축(uniaxial) 키리가미 패턴을 형성하였다. 이때, 키리가미 패턴은 소자의 길이 방향을 따라 양 끝과 중간을 0.5 cm 간격으로 번갈아 가며 1.2 cm와 2 cm 길이로 각각 잘라 형성하였다. 인장변형 중 소재 영률 차이에 의한 기계적 파손과 전기적 단락을 방지하기 위해, 폴링(poling) 및 성능 측정을 위한 구리 도선은 전도성 에폭시를 사용하지 않고 바느질로 전극에 직접 고정하였다. 제작된 전극을 모기판에서 분리된 압전 복합 소재 필름 상·하부에 순수한 ecoflex를 4,000 rpm으로 30

초 동안 각각 스핀코팅하여 부착하고, 최종적으로 ecoflex를 이용하여 소자 전체를 캡슐화(encapsulation)하여 보호하였다. 제작된 S-PEH의 압전 발전성능을 극대화하기 위해 50 kV/cm의 전기장과 120°C의 열을 인가하며 압전체의 쌍극자 도메인(dipole domain)을 특정 방향으로 정렬하는 폴링 공정을 수행하였다. 이때, 본 연구에서는 소자의 구조 및 공정 최적화가 부족하여 전극과 복합소재 계면의 기포를 완전히 제거하지 못했으며, 비압전성 유전체인 ecoflex가 두껍게 존재하기 때문에 결과적으로 불충분한 전기장에서 폴링을 수행하게 되었다. 이는 후속 연구를 통해 최적화를 진행함으로써 개선될 수 있을 것으로 기대된다. 그림 1(b)와 (c)는 제작된 S-PEH의 실제 이미지를 보여주며, 개발 소자의 신축성이 우수함을 확인할 수 있다.

X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지 분석을 통해, 제조된 BaTiO₃ 압전 분말이 기존에 보고된 강유전 페로브스카이트 결정구조(JCPDS 01-073-1739)와

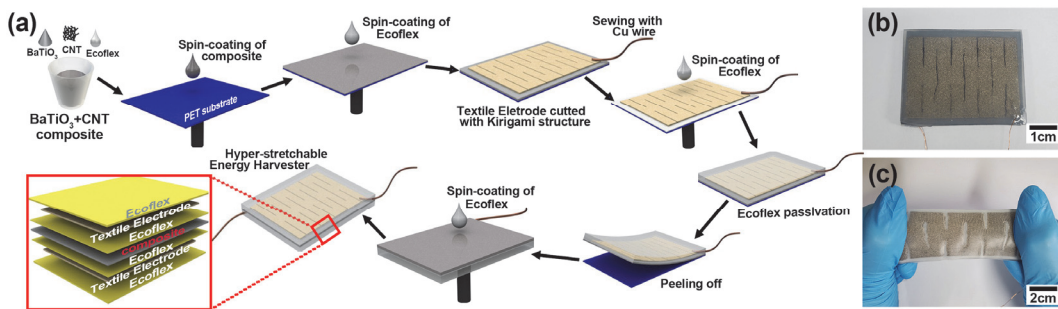


Fig. 1. (a) Schematic illustration for the fabrication procedure of the S-PEH, (b,c) photograph of the S-PEH in (b) original and (c) stretched states.

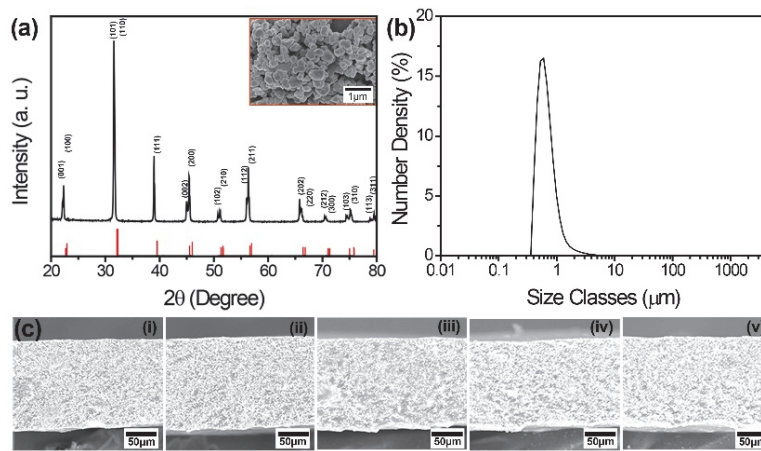


Fig. 2. (a) XRD pattern and SEM image (insert) of the synthesized piezoelectric BaTiO₃ nanoparticles, (b) particle size analysis results of BaTiO₃ nanoparticles, and (c) cross-sectional SEM image of the piezoelectric composite layer with various BaTiO₃-CNTs concentrations.

고상법을 통해 합성되는 전형적인 나노입자의 형상을 지님을 확인하였다 [그림 2(a)]. BaTiO₃ 나노입자의 입도는 분말 시료를 에탄올 용매에 분산시킨 후 레이저 회절(laser diffraction)법을 이용하여 분석하였다 [그림 2(b)]. 합성된 BaTiO₃ 입자는 평균 662 nm의 균일한 크기 분포로 합성되었으며, 이는 SEM 분석을 통해 확인된 결과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 2(c)는 3,000 rpm으로 30초 동안 스피닝된 다양한 입자 함량의 압전 복합소재의 단면 SEM 이미지를 보여준다. BaTiO₃ 나노입자와 CNTs가 응집되거나 침전되지 않고 고분자 기상 내에 잘 분산되어 있으며, 복합체의 조성이 달라지더라도 두께는 약 100 μm로 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 이는 입자 분산도 및 복합소재 두께에 따른 영향 없이 다양한 입자 함량을 갖는 S-PEHs의 발전 성능을 동일한 조건에서 평가할 수 있음을 의미한다.

S-PEH의 압전 발전성과 내구성 평가를 위해 굽힘장치(bending machine system)를 이용하여 반복적이고 규칙적인 인장 변형을 인가하였다. 이때, 소자에서 생성되는

개방 회로 전압(open-circuit voltage, V_{OC})과 단락 전류(short-circuit current, I_{SC})는 전위계(electrometer)를 이용하여 실시간으로 측정되었다. 그림 3은 다양한 인장 변형률에 따라 개발 S-PEHs에서 생성된 출력 전압 및 전류 신호를 보여준다. 그림 3(a)에서 확인 가능하듯이, 하베스터에서 생성되는 V_{OC} 는 압전 나노입자의 함량과 소자의 인장 변형률에 비례하여 지속적으로 증가하였으며, BaTiO₃/CNTs 분말이 30:1 중량비로 첨가된 소자를 150% 인장하였을 때 ~5 V의 최대 전압을 생성하였다. 그림 3(b)는 최대 전압을 도출한 30:1 비율의 소자에서 변형률에 따라 생성되는 I_{SC} 를 보여주며, 전압과 동일한 경향으로 변형이 커질수록 전류 신호가 증가하여 최대 50 nA를 생성하였다.

제작된 S-PEH의 출력 전력을 평가하기 위해 100 kΩ에서 900 MΩ의 저항을 회로에 각각 병렬로 연결하며 부하 전압(load voltage, V_L)을 측정하였다 [그림 4(a)]. 측정된 V_L 은 외부 저항이 커질수록 점차 증가하여 900 MΩ에서 V_{OC} 와 유사한 5 V의 최대 전압이 확인되었다. 출력 전력은 $P=V \times I$ 의 관계와 옴의 법칙(Ohm's law)을 이용하여 도출

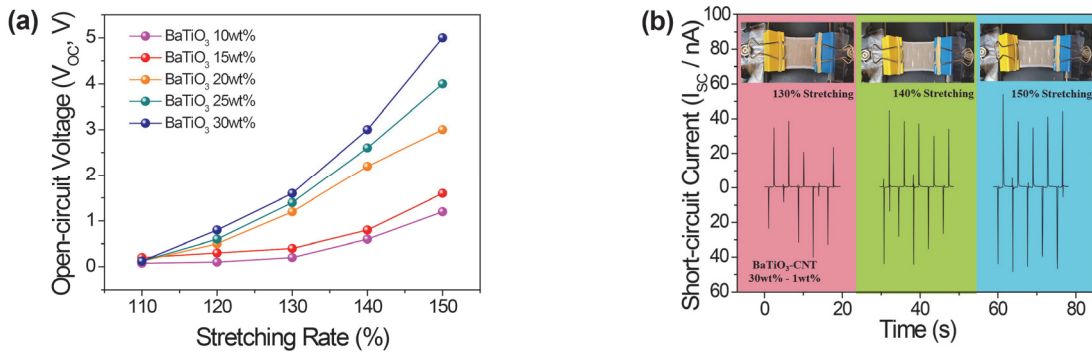


Fig. 3. (a) The open-circuit voltage variation according to BaTiO₃ ratio and stretching rate and (b) the short-circuit current generated from the S-PEH with a BaTiO₃-CNT ratio of 30:1 according to the stretching rates.

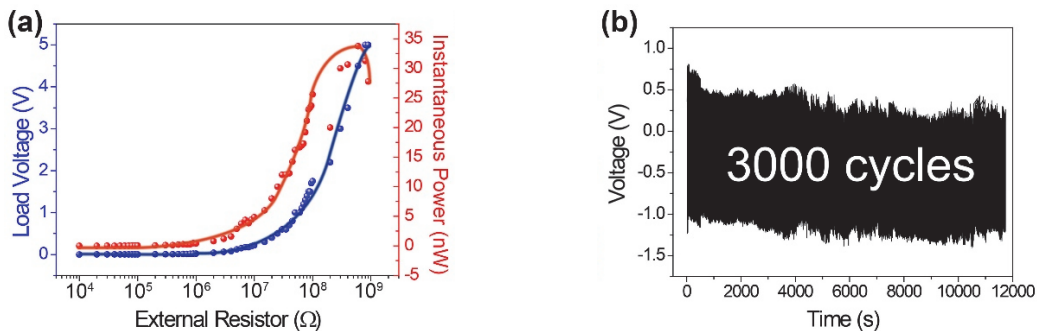


Fig. 4. (a) Generated output voltage under varied external resistance loadings in the range from 100 kΩ to 900 MΩ and calculated instantaneous output power with respect to the load and (b) the test results for the durability of the S-PEH under periodical bending/releasing conditions for up to 3,000 cycles.

되었으며, 600 MΩ에서 약 33.75 nW의 최대 순간 전력이 생성됨을 확인하였다. S-PEH에 120%의 인장 변형률로 ~3,000 회의 반복적인 변위를 인가하며 기계적 안정성을 평가하였다 [그림 4(b)]. 출력 전압은 전체 변형 주기 동안 거의 일정하게 유지되어 개발 소자가 우수한 내구성을 지님을 보여준다. 이는 본 연구에서 제안한 소자 제작 방법 및 구조가 웨어러블 센서에 적용 가능할 정도로 신축성이 있고 기계적으로 안정적임을 나타내는 결과이다.

본 연구에서는 자가발전 웨어러블 시스템에 적용하기 위한 S-PEH를 구현하기 위해 압전 복합소재와 키리가미 패턴된 전극을 도입하였다. 신축성의 복합체는 BaTiO₃ 나노입자를 소량의 CNTs와 함께 고분자 기상 내에 분산하여 제조하였다. 이때 CNTs는 압전 나노입자로의 응력 전달 효율을 향상시키기 위해 첨가되었다. 전극에 일축 키리가미 패턴을 도입하여 신축성을 향상시켰으며, 구리 도선을 전극에 직접 바느질하여 인장 변형에서의 내구성을 확보하였다. 분산재 함량 최적화 결과, S-PEH의 발전 성능은 BaTiO₃와 CNTs가 30:1 중량비로 첨가되었을 때 150%의 변형에서 ~5 V와 50 nA로 최대임을 확인하였다. 개발 S-PEH의 출력 성능은 후속 연구를 통한 소자 구조 및 풀링 조건 최적화로 개선할 수 있으며, ecoflex의 두께 감소와 키리가미 패턴의 최적화 및 다양화를 통해 개발 소자의 모든 방향으로의 신축성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. S-PEH는 약 3,000회의 인장 변형 동안 성능 감소 없이 우수한 내구성을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로, 본 연구에서 제안된 S-PEH의 소재 및 구조는 굽힘, 인장, 뒤틀림 등 다양한 형태의 기계적 변형이 존재하는 의류 및 신체로의 사용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2021R1A4A2001658 and No.2022R1A2C1003853)을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- [1] T. Kim and I. Park, *J. Sens. Sci. Technol.*, **31**, 71 (2022). doi: <https://doi.org/10.46670/jsst.2022.31.2.71>
- [2] N. Anusha, B. P. Kumar, and L. Agarwal, *2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)* (IEEE, Vijayawada, India, 2022) p. 1. doi: <https://doi.org/10.1109/aisp53593.2022.9760637>
- [3] P. Sundriyal, M. Sahu, O. Prakash, and S. Bhattacharya, *Nano-Energetic Materials* (Springer, Singapore, 2019) p. 215. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2_10
- [4] G. Ferin, T. Hoang, C. Bantignies, H. L. Khanh, E. Flesch, and A. Nguyen-Dinh, *Proc. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* (IEEE, Taipei, Taiwan, 2015) p. 1. doi: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2015.0534>
- [5] J. Zhao and Z. You, *Sensors*, **14**, 12497 (2014). doi: <https://doi.org/10.3390/s140712497>
- [6] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, *Proc. IEEE*, **96**, 1457 (2008). doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2008.927494>
- [7] D. Y. Hyeon and K. I. Park, *J. Powder Mater.*, **26**, 119 (2019). doi: <https://doi.org/10.4150/kpmi.2019.26.2.119>
- [8] G. T. Hwang, V. Annapureddy, J. H. Han, D. J. Joe, C. Baek, D. Y. Park, D. H. Kim, J. H. Park, C. K. Jeong, K. I. Park, J. J. Choi, D. K. Kim, J. Ryu, and K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1600237 (2016). doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201600237>
- [9] Z. L. Wang and W. Wu, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 11700 (2012). doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201201656>
- [10] Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, **24**, 280 (2012). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201102958>
- [11] Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **18**, 3553 (2018). doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.200800541>
- [12] Y. Ding, P. Cai, and Z. Wen, *Chem. Soc. Rev.*, **50**, 1495 (2021). doi: <https://doi.org/10.1039/d0cs01239d>
- [13] R. Hamid and M. R. Yuce, *Sens. Actuators, A*, **257**, 198 (2017). doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.02.026>
- [14] Y. Wu, Y. Ma, H. Zheng, and S. Ramakrishna, *Mater. Des.*, **211**, 110164 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110164>
- [15] S. S. Ham, G. J. Lee, D. Y. Hyeon, Y. G. Kim, Y. W. Lim, M. K. Lee, J. J. Park, G. T. Hwang, S. Yi, C. K. Jeong, and K. I. Park, *Composites, Part B*, **212**, 108705 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108705>
- [16] J. H. Han, K. I. Park, and C. K. Jeong, *Sensors*, **19**, 1444 (2019). doi: <https://doi.org/10.3390/s19061444>
- [17] K. I. Park, *J. Powder Mater.*, **25**, 263 (2018). doi: <https://doi.org/10.4150/kpmi.2018.25.3.263>
- [18] A. Harb, *Renewable Energy*, **36**, 2641 (2011). doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>
- [19] J. Yu, X. Hou, M. Cui, N. Zhang, S. Zhang, J. He, and X. Chou, *Mater. Lett.*, **269**, 127686 (2020). doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127686>
- [20] K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. Byun, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **26**, 2514 (2014). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201305659>
- [21] S. C. Park, J. H. Lee, Y. G. Kim, and K. I. Park, *J. Korean Inst.*

- Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 72 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.1.11>
- [22] J. Hao, W. Li, J. Zhai, and H. Chen, *Mater. Sci. Eng.*, **135**, 1 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.08.001>
- [23] J. Yu, L. Chen, X. Hou, J. Mu, J. He, W. Geng, X. Qiao, and X. Chou, *J. Materiomics*, **8**, 247 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.10.007>
- [24] L. Lu, W. Ding, J. Liu, and B. Yang, *Nano Energy*, **78**, 105251 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105251>
- [25] K. I. Park, C. K. Jeong, N. K. Kim, and K. J. Lee, *Nano Convergence*, **3**, 12 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1186/s40580-016-0072-z>
- [26] L. Deng, W. Deng, T. Yang, G. Tian, L. Jin, H. Zhang, B. Lan, S. Wang, Y. Ao, B. Wu, and W. Yang, *J. Funct. Biomater.*, **14**, 37 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/jfb14010037>
- [27] W. J. Lee, S. Y. Park, H. J. Nam, and S. H. Choa, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, **25**, 129 (2018).
doi: <https://doi.org/10.6117/kmeps.2018.25.4.129>
- [28] M. Amjadi, Y. J. Yoon, and I. Park, *Nanotechnology*, **26**, 375501 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/37/375501>
- [29] C. Baek, J. H. Yun, J. E. Wang, C. K. Jeong, K. J. Lee, K. I. Park, and D. K. Kim, *Nanoscale*, **8**, 17632 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/c6nr05784e>
- [30] G. M. Lous, I. A. Cornejo, T. F. McNulty, A. Safari, and S. C. Danforth, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**, 124 (2000).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01159.x>
- [31] V. F. Janas and A. Safari, *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 2945 (1995).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb09068.x>
- [32] C. K. Jeong, K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, S. H. Lee, D. Y. Park, H. E. Lee, H. K. Lee, M. Byuna, and K. J. Lee, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 4035(2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/c4ee02435d>
- [33] J. H. Bae, S. S. Ham, S. C. Park, and K. I. Park, *J. Sens. Sci. Technol.*, **31**, 312 (2022).
doi: <https://doi.org/10.46670/jsst.2022.31.5.312>
- [34] S. He, W. Dong, Y. Guo, L. Guan, H. Xiao, and H. Liu, *Nano Energy*, **59**, 745 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.025>
- [35] C. Baek, J. E. Wang, S. Ryu, J. H. Kim, C. K. Jeong, K. I. Park, and D. K. Kim, *RSC Adv.*, **7**, 2851 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1039/c6ra26285f>
- [36] X. L. Chen, Z. Y. Zhao, and K. M. Liew, *Adv. Eng. Software*, **39**, 121 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.12.004>
- [37] J. M. Abu-Khalaf, L. Al-Ghussain, and A. Al-Halhouli, *Materials*, **11**, 2377 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma11122377>
- [38] Q. Zhang, Y. Gao, and J. Liu, *Appl. Phys. A*, **116**, 1091 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8191-4>
- [39] J. Lee, S. Chung, H. Song, S. Kim, and Y. Hong, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46**, 105305 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/10/105305>
- [40] X. Zhou, K. Parida, O. Halevi, Y. Liu, J. Xiong, S. Magdassi, and P. S. Lee, *Nano Energy*, **72**, 104676 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104676>
- [41] H. Zhou, Y. Zhang, Y. Qiu, H. Wu, W. Qin, Y. Liao, Q. Yu, and H. Cheng, *Biosens. Bioelectron.*, **168**, 112569 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112569>
- [42] H. Gong, Y. Zhang, J. Quan, and S. Che, *Curr. Appl. Phys.*, **11**, 653 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.10.021>