

Nd:YAG Laser 직접 각인을 이용한 Carbon 스트레인 센서

주동현¹ · 윤상우² · 김주한² · 박우태^{1,2,†}

¹서울과학기술대학교 의공학-바이오소재 융합협동과정

²서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Carbon strain sensor using Nd: YAG laser Direct Writing

Donghyun Joo¹, Sangwoo Yoon², Joohan Kim², and Woo-Tae Park^{1,2,†}

¹Convergence Institute of Biomedical Engineering and Biomaterial, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

²Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received March 19, 2018: Corrected March 23, 2018: Accepted March 25, 2018)

초 록: Nd:YAG Laser를 이용하여 polyimide film에 탄화(carbonization)를 진행하여 Carbon을 생성하여 저가의 센서를 간단한 제조과정으로 만들었다. 이를 통하여 유연한 저가형 압저항 센서의 특성에 관한 연구를 수행하였다. 기존에 많은 연구들이 Polyimide에 10.6 μm 의 파장을 가지는 CO₂ laser를 이용하여 carbonization을 하여 센서를 제작하였다. 본 논문에서는 polyimide film에 1.064 μm 의 파장을 가지는 Nd:YAG laser를 이용하여 carbonization(탄화공정)을 진행하였다. 또한 Nd:YAG laser를 사용하여 polyimide film위에 직접 탄화시키며 carbon을 생성하는 최적의 전력밀도(W/cm²)과 속도(scan rate) 조건 조합을 찾아 해상도를 높였다. CO₂ laser를 사용하였던 기존의 선행연구에서는 carbon생성의 최소 선폭이 140~220 μm 의 길이를 가졌지만, 본 연구에서는 카본의 생성되는 선폭이 35~40 μm 으로 축소시켰다. 이번 연구에서 제작된 센서의 초기 면저항은 100~300 Ω/\square 이었다. 곡률 반경 21 R로 인장을 하였을 때 저항이 30% 줄어들었고, 이를 통하여 계산된 게이지 팩터는 56.6이었다. 본 연구는 압저항 센서를 제조하기 위한 단순하고, 매우 유연하고 저렴한 공정을 제공한다.

Abstract: Nd:YAG laser was used to carbonize polyimide films to produce carbon films. This is a simple manufacturing process to fabricate low cost sensors. By applying this method, we studied characteristics of flexible and low-cost piezoresistive. Previously, many studies focused on carbonization of polyimide using CO₂ laser with wavelength of 10.6 μm . In this paper, carbonization (carbonization process) was performed on polyimide films using an Nd:YAG laser with a wavelength of 1.064 μm . In order to increase the resolution, we optimized the laser conditions of the power density (W/cm²) and the beam scan rate. In previous studies using CO₂ laser, the minimum line width was 140~220 μm but in this study, carbon line width was reduced to 35~40 μm . The initial sheet resistance of the carbon sensor was 100~300 Ω/\square . The resistance decreased by 30% under stretched with a curvature radius of 21 R. The calculated gauge factor was 56.6. This work offers a simple, highly flexible, and low-cost process to fabricate piezoresistive sensors.

Keywords: Carbonization, Carbon, Laser, Polyimide, Piezoresistive, Strain Sensor

1. 서 론

센서란 물리, 생물, 화학적인 외부의 양이나 그 변화를 감지하거나 구분 및 계측하고 검출하여 컴퓨터나 제어장치가 이해할 수 있는 전기적인 신호로 변환하는 장치이다. 스트레인 게이지 센서(strain gauge sensor)는 미세한 기계적인 변화를 전기적 신호로 검출하는 센서로써 구조

체의 인장과 압축 같은 변형상태를 정밀하게 측정할 수 있다. 기존에 개발된 금속 스트레인 게이지는 게이지팩터가 낮아 센서의 감도가 낮다는 단점이 있다.

상용화 되고 있는 대부분의 압저항(piezoresistive) 센서들은 반도체 공정을 통해 생산되고 있다. 하지만 이렇게 제작된 센서들은 뛰어난 성능에도 불구하고 제작에 상대적으로 많은 시간소모, 비싼 재료가격, 비싼 제작 비용을

[†]Corresponding author
E-mail: wtpark@seoultech.ac.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

가지고 있다.

최근에 들어 반도체공정의 제조 기법의 대안으로 더 경제적인 제작 기법을 활용하려는 연구들이 있다. 탄소나노튜브(carbon nano tube)¹⁾와 탄소블랙(Carbon black)²⁾ 폴리머(PDMS)를 사용한 압저항 센서 제작³⁾, 탄소잉크(carbon Ink)를 사용하여 잉크젯(inkjet) 기술을 사용하여 센서 제작⁴⁾ 등이 있다. 이러한 새로운 제조 방법³⁻⁵⁾ 간단한 공정과정과 높은 유연성을 가지고 있고, 저렴한 비용의 이점을 가지고 있다.

유연한 스트레인 센서(strain sensor)는 인체의 곡면을 효과적으로 감쌀 수 있어, 정확한 생체신호를 측정하기 용이하다. 이러한 센서들로 족적의 압력을 측정하여 걸음걸이를 파악⁶⁾, 손가락의 굽힘에 따라 움직임을 모니터링하여 신호를 전달⁷⁾, 손가락 접촉 시의 압력측정⁸⁾, 제스처를 인식⁹⁾, 심장 박동의 물리적 힘의 측정¹⁰⁾, 맥박 측정¹¹⁾, 말하는 동안 성대의 진동을 측정¹²⁾, 그리고 얼굴의 표정에 따른 변화를 측정하였다.¹³⁾

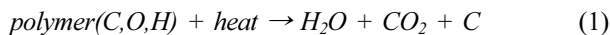
현재 laser를 사용한 carbonization 연구에서는 대부분이 CO₂ laser를 사용하여 carbon을 생성시키고 있지만^{11,14,15)}, 본 논문에서는 CO₂ laser 보다 더욱 세밀한 패턴이 가능한 Nd:YAG laser를 사용하여 carbonization을 진행함으로써 CO₂ laser를 사용한 그룹보다 작은 너비의 폭을 가지는 센서를 제작 할 수 있었다.

2. 실험

2.1. 탄화 공정(Carbonization process)

재료와 레이저 사이의 광상호작용은 레이저의 빔이 가진 특성인 에너지 밀도(beam intensity), 펄스폭(pulse width), 파장(wavelength)과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 그 외에도 온도, 습도처럼 주변 환경에 따라서도 다른 반응을 보인다. 그 중 임계 어블레이션 플루언스(fluence)보다 낮은 플루언스의 레이저가 폴리머에 조사될 시에는 열 반응으로 인해 부분적으로 탄화(carbonize)가 발생한다.¹⁶⁾

일반적으로 폴리머(polymer)는 일정 온도 이상에서 열분해(thermal degradation)를 통하여 약한 화학결합이 끊어져 유실되는 반응이 일어난다. 특히, 무산소 환경에서 이루어지는 열분해 반응(pyrolysis)은 유기물의 기본 구성원소인 탄소로 구성된 비정질(amorphous) 또는 그래파이트(graphite) 형태의 결합물을 최종적으로 생성하게 된다. 일반적으로 열에 의한 폴리머의 탄화 과정은 다음과 같은 반응식으로 나타낼 수 있다.



실험에 사용된 레이저는 1064 nm의 파장의 연속파 파이버 레이저이며 실험 관련 셋업은 Fig. 1과 같다. 레이저 빔의 스캐닝 경로는 100 mm의 초점 거리를 가지고 있는

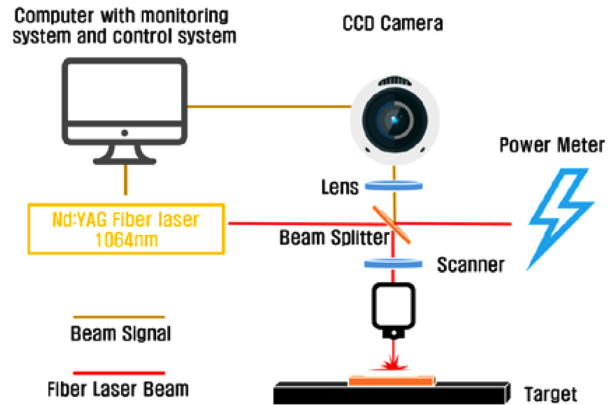


Fig. 1. Schematic of 1064 nm Nd:YAG Fiber Laser.

갈바노미터(galvanometer)를 이용하여 컨트롤 하였고, 마이크로 모션 스테이지를 이용해 어블레이션 타겟 및 패턴을 컨트롤 하였다.

2.2. 제작 방법

본 연구에 제작된 carbon 스트레인 센서는 3M 회사의 Model 5413K의 두께 70 μm polyimide film에 1064 nm 파장(wave length)을 가지고 있는 IPG회사의 model YLR-50-SM-AC Nd:YAG laser로 직접적으로 polyimide에 carbonization을 함으로써 유연한 저가형 센서 제작이 탄화가 가능하도록 하였다.

Fig. 2는 센서제작 순서를 나타낸다. 저가형 센서의 개발을 위하여 5 × 5 cm 아크릴 3T의 두께의 판에 4x × 4 cm의 두께 70 μm polyimide Film을 부착한 후 polyimide film에 직접적으로 Nd:YAG fiber laser를 이용하여 carbonization을 하여 carbon을 생성시켰다. Polyimide film 위에 carbon을 생성시킨 후 PDMS-A(Sylguard 184-A, Dow corning)에 PDMS-B 경화제(Sylguard 184-B, Dow corning)를 10:1 비율로 혼합하여 polyimide film위에 부어주었다. 그리고 진공 상태에서 공기 방울을 제거 후 oven에서 60°C로 120분 동안 경화시켰다. 그리고 polyimide Film에서 carbon이 전사된 PDMS를 분리하였다. 마지막으로 carbon이 전사된 PDMS에 carbon의 위아래에 copper wire와 copper tape를 부착하여 electrode와 전선을 연결 하였다. 이 과정에서 접촉저항을 줄이는 게 중요하였다. 실버에폭시(silver epoxy), 납땀, 그리고 copper tape 등 여러가지를 사용하였지만 copper tape를 사용하였을 때 가장 안정적으로 측정이 가능하였다.

Fig. 3(a)는 아크릴 위에 polyimide를 부착하여 laser를 사용하여 carbonization을 진행하여 carbon을 생성되는 사진이다. Fig. 3(b)는 polyimide Film에 carbon이 생성된 것을 PDMS로 전사하여 PDMS에 carbon이 전사된 것을 확인 하는 사진이다. Fig. 3(c)는 PDMS에 전사된 carbon에 copper tape를 부착시킨 사진이다. polyimide는 PDMS에 비해 변형량이 작기에 더 탄성이 좋고 변형량이 높은 PDMS에 carbon을 전사함으로써 더욱 유연하게 제작하

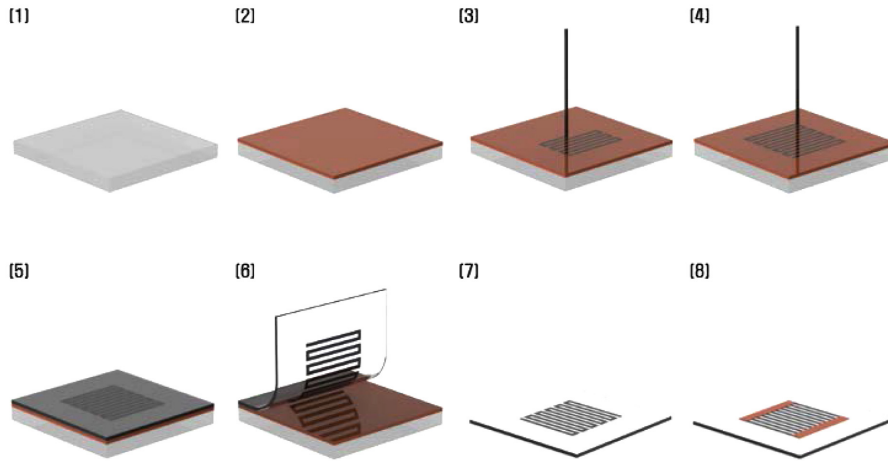


Fig. 2. Strain sensor manufacturing process.



Fig. 3. (a) Carbon is generated on Polyimide (b) Generated carbon of polyimide was transferred to PDMS (c) Sensor completed with copper tape.

였다.

3. 결과 및 검토

3.1. 면저항 측정

선행연구들은^{9,12,13} CO₂ laser를 사용하여 연구를 진행하였지만 본 연구에서는 Nd:YAG laser를 사용하여 연구를 진행하였기에 선행연구에서의 power(W)와 speed(scan rate)의 조건과 본 연구에서 사용하는 공정 조건이 다르기 때문에 새로운 공정 변수 찾아야 했다. 본 연구에서는 선행연구들의 조건과 다르게 50.93~203.72 kW/cm²의 power density와 150~250 mm/s speed의 laser 조건으로 carbon을 생성시켰다.

표시가 안된 조건들은 에너지가 너무 적거나 많아서 카본이 생성이 안되거나, 폴리머가 너무 타서 구멍이 뚫려서 저항 측정이 안되었다.

Nd:YAG laser를 사용하여 carbonization을 진행한 resistance는 멀티미터를 사용하여 측정하였다. Fig. 4에서는 측정된 속도와 파워의 변화에 따라 저항을 나타내었다.

$$R_{sheet} = \frac{\rho}{x_j} \quad (2)$$

위에 사용된 수식은 R_{sheet} (sheet resistance), x_j (thickness), ρ (resistivity)로써 위의 공식을 이용하여 sheet resistance를 Table 1에 Nd:YAG laser의 속도와 파워밀도의 변화로

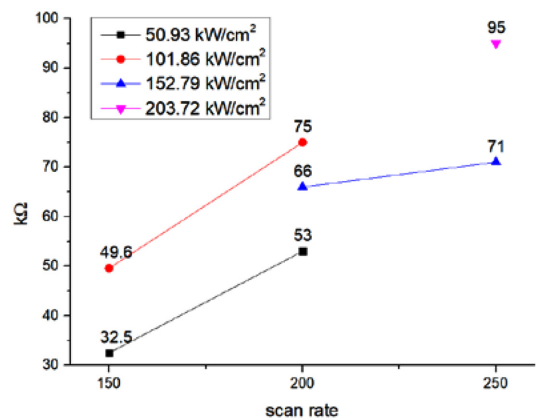


Fig. 4. Resistance of power vs. scan rate.

나타내었다. 면저항은 저항의 크기나 형상에 상관없이 만들어진 저항을 정량화 하기 위하여 사용하였다. 높은 laser의 출력을 사용하면 면저항 또한 증가하였다. 이는 carbon의 완전 연소량이 증가하여 저항이 일부증가 한다고 생각된다.^{17,18)}

3.2. Carbon 기반 센서의 압축, 인장

개발된 carbon센서 저항 측정 후 일정한 변형량을 인가하여 저항의 변화를 측정하였다. 저항 센서의 민감도는 게이지팩터(Gauge Factor)라는 인자로 표현되며 이는 저항의 변화비($\Delta R/R$)와 변형량($\epsilon = \Delta L/L$)의 비로 나타난다. 분모와 분자가 비(ratio)이기 때문에 게이지팩터의 단위는 무차원이다. 이러한 게이지 팩터는 금속 스트레인 게이

Table 1. Sheet Resistance result from power density and scan speed variation

Speed	50.93 kW/cm ²	101.86 kW/cm ²	152.79 kW/cm ²	203.72 kW/cm ²
250 mm/s		258 Ω/□	345 Ω/□	
200 mm/s	193 Ω/□	256 Ω/□	240 Ω/□	
150 mm/s	118 Ω/□	180 Ω/□		
Power	kW/cm ²	kW/cm ²	kW/cm ²	kW/cm ²

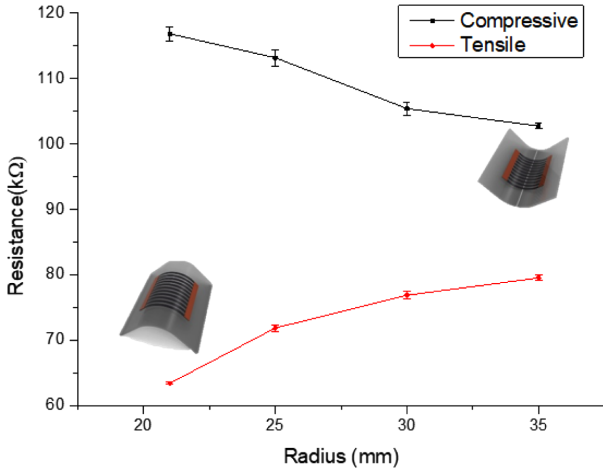


Fig. 5. Tensile, compression strain for resistance measurement vs. radius of curvature.

지는 2.0정도의 값을 갖고, 실리콘 반도체 압저항 스트레인 게이지는 50~100정도의 값을 가진다. 우리는 여기서 금속 스트레인 게이지 보다는 높은 값을 기대하며, 실리콘 스트레인 게이지보다는 높은 최대변형량을 기대하며 측정을 준비하였다. PDMS에 전사된 carbon 센서에 변형량을 인가하는 방법은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 일정한 곡률반경을 인가하여 그 곡률에 해당하는 변형량을 계산하여 측정하였다.

Fig. 5는 시편에 곡률을 인가하여 인장과 압축 변형을 주었을 때 곡률에 대비하여 생기는 저항의 변화를 측정하여 그래프로 나타내었다.

센서를 인장, 압축 함에 따라 센서에서 변화되는 저항 값을 측정하고 이를 바탕으로 측정값의 선형성도 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제작된 스트레인 센서의 초기저항은 $91.54 \pm 0.65 \text{ k}\Omega$ 이었다. Fig. 6의 그래프에서는 인가한 곡률 반경 21~35R의 곡률반경을 $230 \mu\text{m}$ 의 측정된 두께를 이

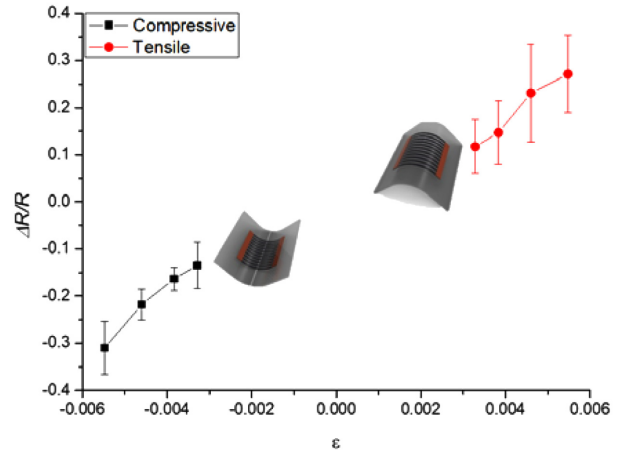


Fig. 6. Tensile, compression resistance change vs. strain.

용하여 변형량으로 계산하여 표현하였다. 스트레인 센서를 인장하였을 경우에는 저항이 최대 30% 줄어들었고, 압축하였을 경우에는 저항이 최대 27% 증가하였다. Fig. 6에 표시된 데이터의 기울기가 바로 게이지 팩터인데, 35~56.6 정도의 값을 가진다. 게이지 팩터가 일정하지 않다 것은 이 센서의 선형성이 좋지 못하다는 것이다.

3.3. 주사전자현미경 관찰

본 실험을 통해 제작된 carbon strain sensor를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)을 사용하여 관찰하였다. Laser의 패턴은 수직으로 정렬된 마이크로 탄소 입자로 구성된 여러 개의 평행선으로 구성되었다. SEM 이미지는 탄소패턴이 다공성이며 미세 탄소 입자로 구성되어 있음을 보여주고있다.

PDMS를 전사하기 전후를 관찰하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 carbon을 PDMS에 전사하기 전 polyimide 위에 carbon이 있는 사진이다. 탄화가 된 표면은 고른 조도를 가짐을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 polyimide위에 carbon

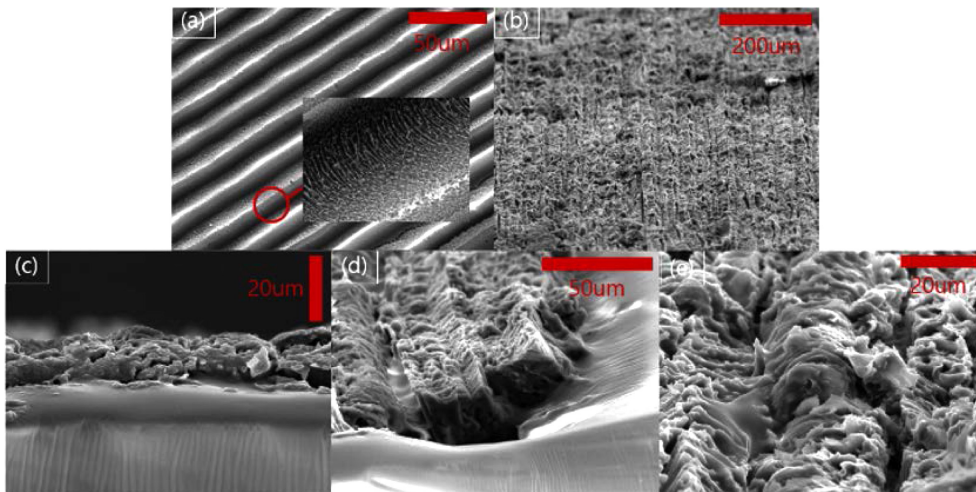


Fig. 7. (a) Carbon pattern on polyimide (b) Carbon patterns transferred to PDMS (c) Check the height of carbon transferred to PDMS (d) edge of Carbon transferred to PDMS (e) Check the width of carbon transferred to PDMS.

이 생성된 후 carbon을 PDMS에 전사 한 후의 사진이다. Polyimide 위에 carbon이 PDMS로 전사 할 때 carbon 이 매끄럽게 떨어지지 않아 Fig. 7(a)에 비하여 Fig. 7(b) 부분이 요철이 있는 것으로 관찰되었다. Fig. 7(c)는 제일 아래층은 PDMS이고 위의 다공성층은 탄소 저항이다. carbon strain sensor의 carbon을PDMS에 전사 후 carbon의 높이는 15~20 μm 정도이고 Fig. 7(c)를 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 7(d)는 carbon을 PDMS에 전사 후 PDMS의 끝부분의 미세 형상을 나타내고 있다. Fig. 7(e)는 carbon의 너비가 30~36 μm 임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 Nd:YAG laser를 사용하여 polyimide에 carbonization을 을 시도하였으며 이를 통해 스트레인 센서를 설계 제작하였다. 제시된 공정의 특징은 레이저 탄화를 수행함으로써 포토 리소그래피와 및 나노 물질 증착 공정이 필요하지 않으며 상온 상압에서 유연 소자에 직접 센서 프린트가 가능하다는 장점을 갖는다.

Laser의 power density는 50.93~152.79 kW/cm^2 에서, scan rate는 150~200 mm/s 에서 안정적으로 carbon이 생성되었다. 곡률을 통하여 인장과 압축의 변형을 주었을 때에는 저항이 ~30% 정도까지 변하여서, 민감도의 척도인 게이지 팩터는 35~56.6의 값을 가졌다. 높은 민감도를 가졌지만 아직 선형성이 좋지 않아, 선형성을 더 개선해야 한다.

우리는 고성능의 신축성 있는 스트레인 센서를 제작하기 위한 빠르고 저렴한 기술을 개발하였다. 저렴한 재료와 일반적인 제조 기술을 이용하여 3시간 이내에 전체 공정을 진행 할 수 있었다. 이 장치는 레이저 탄화를 함으로써 포토 리소그래피와 마이크로 및 나노 물질 증착을 하는 기존 반도체 스트레인 게이지보다 저렴하고 간편하게 제조되었다.

본 공정은 민감도가 높고, 변형량이 많은 조건인 여러 가지 생체측정 분야에 적합할 것으로 보인다..

사사

본 연구는 산업핵심기술개발사업 (10060065) 의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. J. W. Ihm, D.-k. Choi, and H. Ryu, "The Characteristic of Prepared Electrode Catalyst and MEA using CNF and CNT", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 11(1), 59 (2004).
2. T. W. Lee, H. S. Lee, and H. H. Park, "A Study on the Electrical Resistivity of Graphene Added Carbon Black Composite Electrode with Tensile Strain", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(1), 55 (2015).
3. J.-J. Wang, M.-Y. Lin, H.-Y. Liang, R. Chen, and W. Fang, "Piezoresistive nanocomposite rubber elastomer for stretchable MEMS sensor", *Proc. 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Shanghai, China, 550, IEEE (2016).
4. F. Michelis, L. Bodelot, Y. Bonnassieux, and B. Lebental, "Highly reproducible, hysteresis-free, flexible strain sensors by inkjet printing of carbon nanotubes", *Carbon*, 95, 1020 (2015).
5. S. Yao, and Y. Zhu, "Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires", *Nanoscale*, 6(4), 2345 (2014).
6. B. Y. Lee et al., "Biomechanical Parameters in Arch Building Gait Measured by Gait Analysis System with Pressure Sensor", *The Korean Journal of Sports Medicine*, vol. 34, no. 1, (2016).
7. L. Cai, L. Song, P. Luan, Q. Zhang, N. Zhang, Q. Gao, D. Zhao, X. Zhang, M. Tu, F. Yang, W. Zhou, Q. Fan, J. Luo, W. Zhou, P. M. Ajayan, and S. Xie, "Super-stretchable, transparent carbon nanotube-based capacitive strain sensors for human motion detection", *Sci. Rep.*, 3, 3048 (2013).
8. H. Tian, Y. Shu, X.-F. Wang, M. A. Mohammad, Z. Bie, Q.-Y. Xie, C. Li, W.-T. Mi, Y. Yang, and T.-L. Ren, "A graphene-based resistive pressure sensor with record-high sensitivity in a wide pressure range", *Sci. Rep.*, 5, 8603 (2015).
9. J. H. Lee, S. H. Kim, J. J. Lee, D. J. Yang, B. C. Park, S. H. Ryu, and I. K. Park, "A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection", *Nanoscale*, 6(20), 11932 (2014).
10. X. Chang, S. Sun, S. Sun, T. Liu, X. Xiong, Y. Lei, L. Dong, and Y. Yin, "ZnO nanorods/carbon black-based flexible strain sensor for detecting human motions", *Journal of Alloys and Compounds*, 738, 111 (2018).
11. S. Luo, P. T. Hoang, and T. Liu, "Direct laser writing for creating porous graphitic structures and their use for flexible and highly sensitive sensor and sensor arrays", *Carbon*, 96, 522 (2016).
12. S. W. Kim, Y. Lee, J. Park, S. Kim, H. Chae, H. Ko, and J. J. Kim, "A Triple-Mode Flexible E-Skin Sensor Interface for Multi-Purpose Wearable Applications", *Sensors (Basel)*, 18(1), 78 (2017).
13. J. Cao, C. Lu, J. Zhuang, M. Liu, X. Zhang, Y. Yu, and Q. Tao, "Multiple Hydrogen Bonding Enables the Self-Healing of Sensors for Human-Machine Interactions", *Angewandte Chemie International Edition*, 56(30), 8795 (2017).
14. Y. Lu, H. Lyu, A. G. Richardson, T. H. Lucas, and D. Kuzum, "Flexible Neural Electrode Array Based-on Porous Graphene for Cortical Microstimulation and Sensing", *Sci. Rep.*, 6, 33526 (2016).
15. Z. B. Hughes, R. Rahimi, M. Ochoa, and B. Ziaie, "Rapid prototyping of piezoresistive MEMS sensors via a single-step laser carbonization and micromachining process", *Proc. 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, Anchorage, USA, 1287, IEEE (2015).
16. D. H. Ahn, B.G. Bak, D. E. Kim, and D. S. Kim, "Analysis of Polymer Carbonization using Lasers and its Applications for LCD Manufacturing Process", *Korean Society for Precision Engineering*, 27(6), 24 (2010).
17. J. Lin, Z. Peng, Y. Liu, F. Ruiz-Zepeda, R. Ye, E. L. G. Samuel, M. J. Yacaman, B. I. Yakobson, and J. M. Tour, "Laser-

- induced porous graphene films from commercial polymers”, *Nature Communications*, 5, 5714 (2014).
18. S. Wang, Y. Yu, R. Li, G. Feng, Z. Wu, G. Compagnini, A. Gulino, Z. Feng, and A. Hu, “High-performance stacked in-plane supercapacitors and supercapacitor array fabricated by femtosecond laser 3D direct writing on polyimide sheets”, *Electrochimica Acta*, 241, 153 (2017).