

강성도 국부 변환 신축성 기판 위에 제작된 박막 트랜지스터 기반 변형률 센서

조영민¹ · 류경인² · 정성준^{1,2,+}

Thin-Film Transistor-Based Strain Sensors on Stiffness-Engineered Stretchable Substrates

Youngmin Jo¹, Gyungin Ryu², and Sungjune Jung^{1,2,+}

Abstract

Stiffness-engineered stretchable substrate technology has been widely used to produce stretchable displays, transistors, and integrated circuits because it is compatible with various flexible electronics technologies. However, the stiffness-engineering technology has never been applied to transistor-based stretchable strain sensors. In this study, we developed thin-film transistor-based strain sensors on stiffness-engineered stretchable substrates. We designed and fabricated strain-sensitive stretchable resistors capable of inducing changes in drain currents of transistors when subjected to stretching forces. The resistors and source electrodes of the transistors were connected in series to integrate the developed stretchable resistors with thin-film transistors on stretchable substrates by printing the resistors after fabricating transistors. The thin-film transistor-based stretchable strain sensors demonstrate feasibility as strain sensors operating under strains of 0%–5%. This strain range can be extended with further investigations. The proposed stiffness-engineering approach will expand the potential for the advancement and manufacturing of innovative stretchable strain sensors.

Keywords: Strain sensors, Thin-film transistors, Rigid islands, Stiffness engineering, Stretchable transistors

1. 서 론

최근 사물 인터넷 (Internet of Things) 및 웨어러블 (Wearable) 기술이 발전함에 따라 다양한 형태의 표면 또는 형태가 변하는 상황에서 성능 저하없이 동작할 수 있는 신축성 (Stretchable) 전자 소자에 대한 연구가 점점 활발해지고 있다[1-5]. 신축성 전자 소자를 구현할 수 있는 기술 중 강성도 국부 변환 신축성 기판 (Stiffness-engineered substrates) 기술은 강성도가 높은 영역에는 신축성이 없는 전자 소자를 배치하고 강성도가 낮은 영역에는 신축성을 가지는 물질 또는 구조의 금속을 위치시켜서 각각의 소자를 연결하는 신축성 인터커넥트 (Interconnect)로 활용하는 기술이다[6]. 오랜 시간 동안 발전 되어온 다양한 유연 전

자 소자 기술을 적용할 수 있다는 장점 덕분에 강성도 국부 변환 신축성 기판 기술은 높은 전기적 성능을 가지는 신축성 트랜지스터 (Transistor) 제작 혹은 수준 높은 신축성 전자 소자 시연의 핵심 기술로 사용되어 오고 있다[7-12].

그러나 해당 기술로 제작된 신축성 트랜지스터를 기반으로 한 변형률 (Strain) 센서는 아직까지 보고된 바가 없다. 강성도가 높은 영역에 제작된 트랜지스터의 성능은 변형률에 영향을 받지 않고 강성도가 낮은 영역에 제작된 인터커넥트의 저항 값은 변형률에 따라 변하지만 그 정도가 트랜지스터의 전류 변화에 영향을 미치지 않도록 설계되어 왔다. 따라서 강성도 국부 변환 신축성 기판 위에 제작된 트랜지스터를 활용하여 변형률 센서를 구현하기 위해서는 변형률에 따라 트랜지스터의 전류 변화를 유발할 수 있는 새로운 소자와의 결합이 요구된다.

이번 연구에서는 강성도 국부 변환 신축성 기판 위에 기존의 박막 트랜지스터 공정을 진행하여 트랜지스터를 제작한 뒤 트랜지스터의 전류가 변형률에 따라 변할 수 있도록 적절한 범위의 저항을 갖는 신축성 전극을 결합하여 새로운 형태의 변형률 센서를 개발하였다. 센서 검증에 앞서 신축성 전극 제작에 알맞은 물질을 선정하였고 강성도 국부 변환 신축성 기판 위에 제작된 트랜지스터가 정상적으로 동작하는 변형률 범위를 확인하였다. 최종적으로는 그 범위 내에서 트랜지스터와 신축성 전극이 결합된 소자가 변형률 센서로 사용할 수 있는지 검증하였다.

¹ 포항공과대학교 IT 융합공학과(Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology)
77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, Korea

² 포항공과대학교 신소재공학과(Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology)
77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, Korea

⁺Corresponding author: sjjung@postech.ac.kr

(Received: Nov. 16, 2023, Revised: Nov. 23, 2023, Accepted: Nov. 29, 2023)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

2. 연구 방법

2.1 용액 준비

Micro 90 용액은 초순수 물에 2% 부피 비율로 희석되었고 Polydimethylsiloxane (PDMS) 용액은 원액과 경화 용액을 10:1 질량 비율로 혼합하여 준비하였다. 반도체 용액은 p형 반도체인 poly[2,5-(2-octyldodecyl)-3,6-diketopyrrolopyrrole-alt-5,5-(2,5-di(thien-2-yl)thieno [3,2-b]-thiophene) (DPP-DTT)를 클로로벤젠 (Chlorobenzene)에 2 mg/ml 비율로 용해시켰고 상대적으로 얇은 SU-8패턴을 형성하기 위해 SU-8 2015 용액과 SU-8 2000 Thinner 용액이 1:1.2 질량 비율로 섞인 용액이 준비되었다. Teflon 용액은 PTFE AF 1600이 Fluorinert™ FC-40에 1% 질량 비율로 섞여서 제조되었고 CTL-809M 용액과 CT SOLV 180 용액이 1:4 질량 비율로 혼합되어 Cytop 용액이 준비되었다. 자기조립 단분자막 (Self-assembled monolayers) 형성을 위해 2,3,4,5,6-Pentafluorothiophenol (PFBT)와 Isopropanol이 50 µl/ml 비율로 혼합된 용액을 제조하였다.

Poly(ethylene oxide) (PEO)를 초순수 물에 10 mg/ml 비율로 녹여서 PEO 용액을 준비하였고 제조된 PEO 용액, PEDOT:PSS, Ethylene glycol, Triton™ X-100이 47:47:5:1 질량 비율로 섞여서 PEDOT:PSS/PEO 용액이 완성되었다. 이때, PEDOT:PSS 용액으로는 전도성이 높은 PH 1000 PEDOT:PSS 용액과 전도성이 낮은 AI 4083 PEDOT:PSS 용액이 사용되었다.

2.2 소자 제작

여기에 박막 트랜지스터 기반 변형률 센서의 제작 공정은 Fig. 1에 제시되어 있다. 먼저, 희생 층 형성을 위해 Micro 90 용액이 스핀 코팅 (Spin-coating)된 유리 기판 위에 PDMS 용액을 스핀 코팅하여 80 µm 두께의 신축성 기판을 형성하였다. 그 위에 SU-8 2015 용액을 스핀 코팅하여 40 µm 두께의 SU-8 층을 형성한 뒤 포토리소그래피 (Photolithography) 공정을 통해 단단한 섬 구조물 패턴을 형성하였다. 그 위에 8 µm 두께의 얇은 PDMS 박막을 스핀 코팅하여 강성도 국부 변환 신축성 기판을 완성하였다. 이후에는 기존에 보고되었던 박막 트랜지스터 공정이 진행되었다[13]. 화학 기상 증착법을 통해 1 µm 두께의 Parylene 박막을 증착했고 Harima 사의 NPS-L 은나노잉크 (Silver nanoparticle ink)를 잉크젯 인쇄하여 소스/드레인 (Source/drain) 전극을 제작하였다. 반도체 용액을 도포하기 전에 소수성 특성을 지니는 Teflon 용액을 인쇄하여 추후 인쇄될 반도체 용액이 일정한 패턴을 갖도록 하였다. 전극과 반도체 층 사이의 컨택 저항 (Contact resistance)을 낮추기 위해 소스/드레인 전극을 PFBT 용액에 담궈서 자기조립 단분자막을 형성시켰고 디스펜서 (Dispenser) 인쇄 공정을 통해 반도체 용액을 도포하였다. 반도체 용액 도포 후 Teflon 용액의 용매를 스핀 코팅하여 Teflon 인

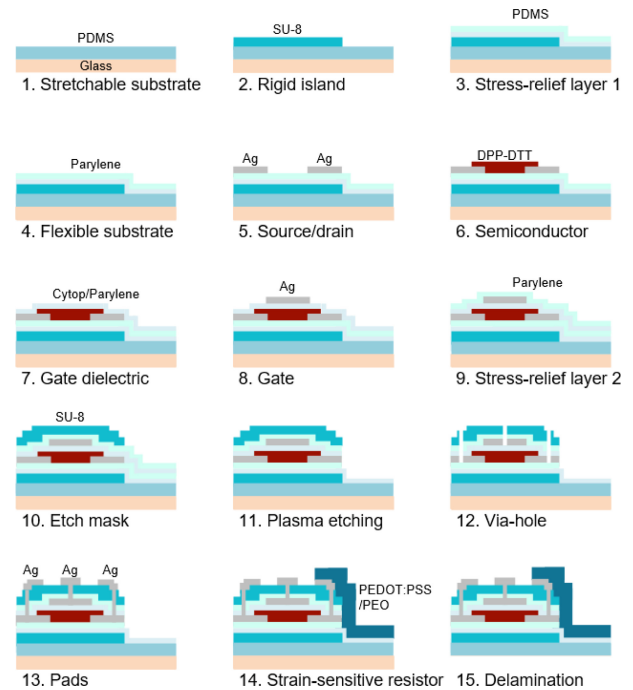


Fig. 1. The fabrication process of the thin-film transistor (TFT)-based strain sensors on stiffness-engineered stretchable substrates.

쇄 패턴을 지웠고 스핀 코팅된 40 nm 두께의 Cytop 유전층과 화학기상증착된 200 nm 두께의 Parylene 유전층을 순서대로 형성하였다. 그 위에 게이트 전극을 잉크젯 인쇄하여 박막 트랜지스터가 완성되었다. 완성 후에는 1 µm 두께의 Parylene 박막이 증착되었고 앞서 형성된 섬 구조와 동일한 형태의 SU-8 구조물이 1 µm 두께로 형성되었다. 그 이후 산소 플라즈마 에칭을 통해 SU-8 구조물이 없는 영역의 Parylene 및 Cytop 박막이 모두 제거되었다. 게이트와 소스/드레인 전극을 외부로 노출시키기 위해 532 nm 파장대의 레이저를 사용하여 비아홀 (Via hole)을 형성하였고 그 구멍은 잉크젯 인쇄된 은나노잉크로 채워졌다. PEDOT:PSS/PEO 용액을 인쇄하여 변형률 감지 저항 소자를 제작하였고 외부로 노출된 소스 전극과 연결하여 박막 트랜지스터와 변형률 감지 저항이 직렬로 연결된 신축성 변형률 감지 센서의 제작을 완성하였다.

2.3 소자 측정

전기적 측정을 위해 Keithley 사의 반도체 파라미터 측정 장비인 4200A-SCS가 사용됐고 신축성 소자와 측정 장비는 Z축 전도성 테이프 (3M, 9703)와 Flexible flat cable을 통해 연결되었다. 변형률 변화를 위해서는 자체 제작된 자동 스테이지 기반 인장력 인가 장비가 사용되었다. 신축성 소자의 양 끝을 자체 제작 장비에 고정시킨 뒤 스테이지를 움직여서 소자의 길이를 증가시키거나 감소시켰다.

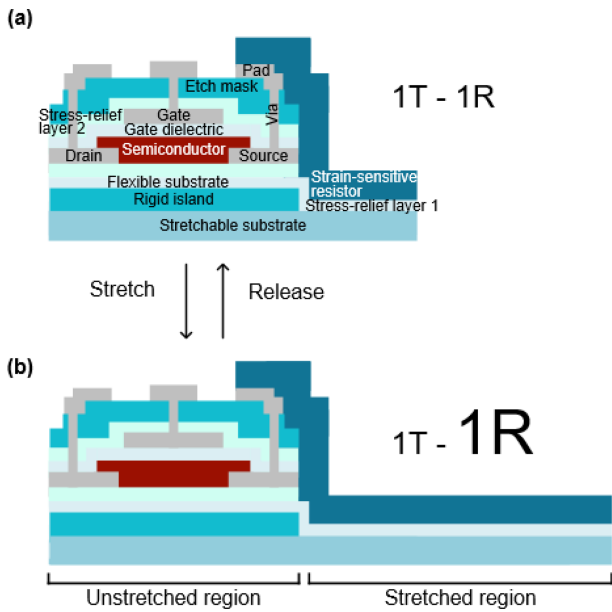


Fig. 2. Schematic diagram of the structure and strain-sensing mechanism of the TFT-based stretchable strain sensors. (a) The strain sensor before being stretched. (b) The strain sensor after being stretched.

3. 결과 및 고찰

3.1 변형률 센서의 구조 및 동작 원리

제한된 변형률 센서는 강성도가 높은 영역에 제작된 박막 트랜지스터의 소스 전극과 강성도가 낮은 영역에 제작된 변형률 감지 저항 전극이 연결된 One transistor-one resistor (1T-1R) 구조를 갖고 있다 (Fig. 2). 신축성 기판에서 단단한 SU-8 섬 구조물이 있는 영역은 강성도가 높고 구조물이 없는 영역은 강성도가 낮다. 신축성 기판에서의 강성도 차이는 인장력이 가해질 때 길이 변형의 차이로 이어지게 된다[14]. 국부적으로 강성도가 다른 신축성 기판에 인장력이 가해질 때, 대부분의 길이 변형은 강성도가 낮은 영역에서 발생한다. 그렇기 때문에, 인장력에 의해 소자 전체의 길이가 변하더라도 강성도가 높은 영역에 위치한 트랜지스터의 전류는 거의 변하지 않고 강성도가 낮은 영역에 위치한 변형률 감지 전극의 저항만이 변하게 된다. 그리고 길이 변형에 의한 저항 변화는 1T-1R 구조의 센서에 흐르는 전류의 변화를 유발하게 된다.

3.2 변형률에 따른 신축성 전극의 전기적 특성 평가

변형률의 변화에 따라 전류 변화를 유발하기 위해서는 길이 변형에 의해 전기적 특성이 변하는 소자의 개발이 필수적이다. 또한, 그 소자를 박막 트랜지스터에 연결하여 사용하기 위해서는 길이 변형에 의한 전기적 특성 변화가 박막 트랜지스터

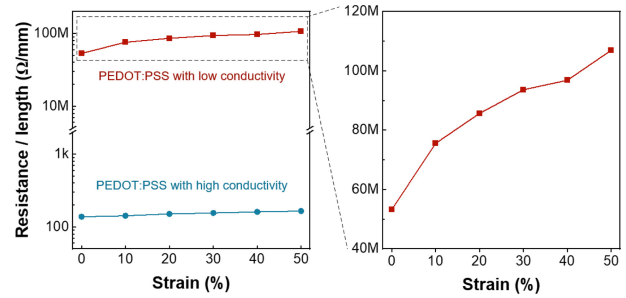


Fig. 3. Resistance per unit length of stretchable electrodes based on two different PEDOT:PSS solutions as a function of applied strain.

의 전기적 특성 변화를 유발할 수 있는 범위 내에 있어야 한다. 위 두가지 요구사항을 만족시키는 소자 개발을 위해 전도성이 다른 두 PEDOT:PSS 용액을 사용하여 신축성 전극을 제작하고 0%부터 50% 사이의 변형률 범위에서 저항 값을 측정하였다.

디스펜서 인쇄 공정을 통해 제작된 두 종류의 신축성 전극은 전도성에 상관없이 변형률이 증가할수록 단위 길이당 저항 값이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3). 전도성이 높은 PEDOT:PSS 용액을 사용한 경우에는 저항 값이 138 ohm에서 165 ohm까지 증가하였고 전도성이 낮은 경우에는 53.2 Mohm에서 107 Mohm까지 증가하였다. 이번 연구에서 사용된 DPP-DTT 반도체 채널을 갖는 박막 트랜지스터의 전체 저항 (Total transistor resistance) 이 1~100 Mohm*cm 사이의 값을 보였던 것을 고려하여[15] 전도성이 낮은 신축성 전극이 박막 트랜지스터의 전류 변화를 유발할 수 있는 변형률 감지 저항 소자로 선택되었다.

3.3 박막 트랜지스터 및 변형률 센서의 전기적 특성 평가

변형률 감지 저항과 연결하기에 앞서 강성도가 높은 영역 위에 제작된 박막 트랜지스터의 변형률에 따른 전달 특성 (Transfer characteristics) 변화를 관찰하였다 (Fig. 4(a)). 게이트 전압 (V_{GS})은 +2 V부터 -10 V까지 스위프 (Sweep) 되었고 드레인 전압 (V_{DS})으로는 -10 V가 인가되었다. 인장력이 가해지지 않았을 때, 박막 트랜지스터는 일반적인 p형 반도체 소자의 동작 형태를 보였고 $V_{GS} = V_{DS} = -10V$ 환경에서 측정된 드레인 전류 (I_{Dl}) 값은 43.9 Mohm 정도의 저항에 해당되는 수치였다. 이는 앞서 측정된 변형률 감지 소자의 저항 변화 범위와 유사한 수준이다. 박막 트랜지스터가 제작된 신축성 기판에 0%부터 10%까지의 변형률을 가했을 때, 드레인 전류 변화는 10% 미만이었다. 이는 10% 이내의 변형률 범위에서 안정적인 동작이 가능함을 의미한다.

10% 이내의 변형률 범위에서 무시할 만한 전류 변화를 보이는 박막 트랜지스터와 50% 이내의 변형률 범위에서 동작하는 변형률 감지 저항을 연결하여 1T-1R 구조의 센서를 제작

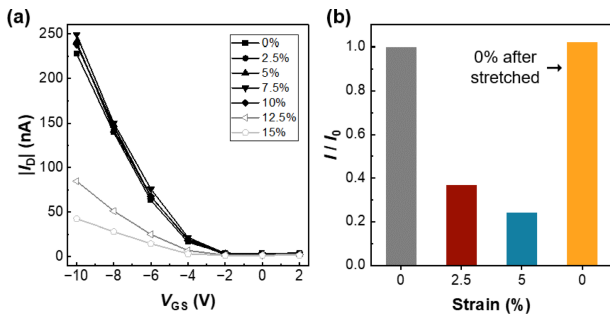


Fig. 4. Electrical characterization ($|I_D|$ vs. V_{GS} at $V_{DS} = -10$ V) of TFTs on rigid islands under various strains. (a) Transfer characteristics of stand-alone TFTs under strains between 0% and 15%. (b) Relative drain current change of a TFT integrated with a stretchable strain-sensitive resistor under strains between 0% and 5%.

하고 변형률에 따른 드레인 전류의 변화를 측정하였다 (Fig. 4(b)). 변형률이 2.5% 그리고 5%으로 변함에 따라 드레인 전류는 변형률이 0%일 때의 전류 대비 각각 64% 및 76% 감소하였다. 그리고 다시 0%로 돌아왔을 때는 초기 전류 값과 거의 유사한 값을 보였다. 5% 이내의 범위에서 보여준 변형률에 따른 전류 변화는 앞서 확인한 결과들을 고려했을 때, 박막 트랜지스터가 아닌 변형률 감지 소자의 저항 변화에서 기인한 것으로 여겨진다.

4. 결 론

이번 연구에서는 강성도 국부 변환 신축성 기관 위에 제작된 박막 트랜지스터를 기반으로 하는 변형률 센서를 최초로 제안하고 그 성능을 평가하였다. 강성도가 낮은 영역에 인쇄된 변형률 감지 소자는 50% 이내의 범위에서 변형률과 비례하는 저항 변화를 보였고 강성도가 높은 영역에 제작된 박막 트랜지스터는 10% 이내의 범위에서 눈에 띄는 성능 저하없이 안정적으로 동작하는 모습을 보였다. 두 소자를 결합하여 제작된 변형률 감지 소자는 5% 이내의 범위에서 변형률 센서로 사용될 수 있다는 가능성을 보였다. 후속 연구를 통해 감지 가능한 변형률의 범위가 확장된다면 이번 연구에서 보고된 강성도 국부 변환 기술을 기반으로 한 접근법이 차세대 변형률 센서의 설계 및 제작을 위한 핵심 기술로 거듭나게 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었음 (2020-DD-UP-0278).

REFERENCES

- [1] S. Wang, J. Xu, W. Wang, G.-J. N. Wang, R. Rastak, F. Molina-Lopez, J. W. Chung, S. Niu, V. R. Feig, J. Lopez, T. Lei, S.-K. Kwon, Y. Kim, A. M. Foudeh, A. Ehrlich, A. Gasperini, Y. Yun, B. Murmann, J. B.-H. Tok, and Z. Bao, "Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array", *Nature*, Vol. 555, No. 7694, pp. 83-88, 2018.
- [2] J. Liu, J. Wang, Z. Zhang, F. Molina-Lopez, G.-J. N. Wang, B. C. Schroeder, X. Yan, Y. Zeng, O. Zhao, H. Tran, T. Lei, Y. Lu, Y.-X. Wang, J. B.-H. Tok, R. Dauskardt, J. W. Chung, Y. Yun, and Z. Bao, "Fully stretchable active-matrix organic light-emitting electrochemical cell array", *Nat. Commun.*, Vol. 11, No. 1, p. 3362, 2020.
- [3] Y. Lee, Y. Liu, D.-G. Seo, J. Y. Oh, Y. Kim, J. Li, J. Kang, J. Kim, J. Mun, A. M. Foudeh, Z. Bao, and T.-W. Lee, "A low-power stretchable neuromorphic nerve with proprioceptive feedback", *Nat. Biomed. Eng.*, Vol. 7, No. 4, pp. 511-519, 2023.
- [4] H. Shim, K. Sim, B. Wang, Y. Zhang, S. Patel, S. Jang, T. J. Marks, A. Facchetti, and C. Yu, "Elastic integrated electronics based on a stretchable n-type elastomer-semiconductor-elastomer stack", *Nat. Electron.*, Vol. 6, No. 5, pp. 349-359, 2023.
- [5] Q. Shen, M. Jiang, R. Wang, K. Song, M. H. Vong, W. Jung, F. Krisnadi, R. Kan, F. Zheng, B. Fu, P. Tao, C. Song, G. Weng, B. Peng, J. Wang, W. Shang, M. D. Dickey, and T. Deng, "Liquid metal-based soft, hermetic, and wireless-communicable seals for stretchable systems", *Science*, Vol. 379, No. 6631, pp. 488-493, 2023.
- [6] Y. Dai, H. Hu, M. Wang, J. Xu, and S. Wang, "Stretchable transistors and functional circuits for human-integrated electronics", *Nat. Electron.*, Vol. 4, No. 1, pp. 17-29, 2021.
- [7] D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, "Epidermal Electronics", *Science*, Vol. 333, No. 6044, pp. 838-843, 2011.
- [8] S. Biswas, A. Schoeberl, Y. Hao, J. Reiprich, T. Stauden, J. Pezoldt, and H. O. Jacobs, "Integrated multilayer stretchable printed circuit boards paving the way for deformable active matrix", *Nat. Commun.*, Vol. 10, No. 1, p. 4909, 2019.
- [9] H. Song, G. Luo, Z. Ji, R. Bo, Z. Xue, D. Yan, F. Zhang, K. Bai, J. Liu, X. Cheng, W. Pang, Z. Shen, and Y. Zhang, "Highly-integrated, miniaturized, stretchable electronic systems based on stacked multilayer network materials", *Sci. Adv.*, Vol. 8, No. 11, p. eabm3785, 2022.
- [10] H. Oh, J.-Y. Oh, C. W. Park, J.-E. Pi, J.-H. Yang, and C.-S. Hwang, "High density integration of stretchable inorganic thin film transistors with excellent performance and reliability", *Nat. Commun.*, Vol. 13, No. 1, p. 4963, 2022.
- [11] J. C. Yang, S. Lee, B. S. Ma, J. Kim, M. Song, S. Y. Kim, D. W. Kim, T.-S. Kim, and S. Park, "Geometrically engineered rigid island array for stretchable electronics capable

- of withstanding various deformation modes”, *Sci. Adv.*, Vol. 8, No. 22, p. eabn3863, 2022.
- [12] H. Cho, B. Lee, D. Jang, J. Yoon, S. Chung, and Y. Hong, “Recent progress in strain-engineered elastic platforms for stretchable thin-film devices”, *Mater. Horizons*, Vol. 9, No. 8, pp. 2053-2075, 2022.
- [13] S. Baek, Y. Lee, J. Baek, J. Kwon, S. Kim, S. Lee, K. P. Strunk, S. Stehlin, C. Melzer, S. M. Park, H. Ko, and S. Jung, “Spatiotemporal Measurement of Arterial Pulse Waves Enabled by Wearable Active-Matrix Pressure Sensor Arrays”, *ACS Nano*, Vol. 16, No. 1, pp. 368-377, 2022.
- [14] W. Kim and S. Jung, “Static Response of Three-Dimensional and Printed Complementary Organic TFTs-Based Static Random-Access Memory”, *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 43, No. 3, pp. 438-441, 2022.
- [15] Y. Lee, J. Kwon, S. Jung, W. Kim, S. Baek, and S. Jung, “Reliable inkjet contact metallization on printed polymer semiconductors for fabricating staggered TFTs”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 116, No. 15, p. 153301, 2020.