

RESEARCH

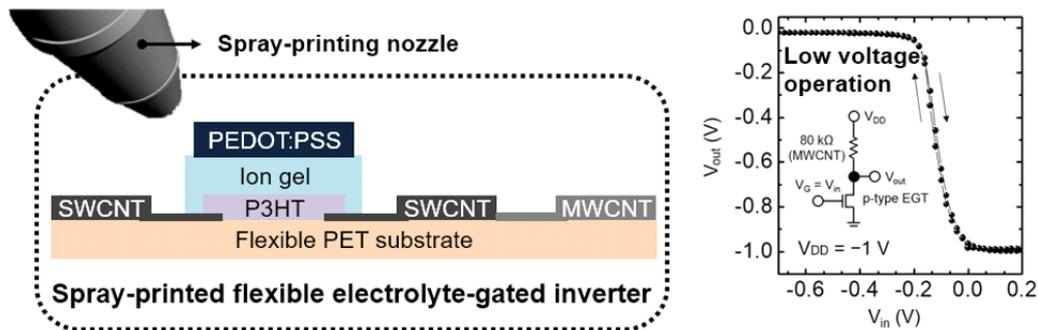
스프레이 프린팅된 1 V 이하의 유연한 전해질 게이트 인버터

조경국, 김민수, 박동현, 이근형*
인하대학교 화학·화학공학 융합학과

Spray-Printed Sub-1 V and Flexible Electrolyte-Gated Inverters

Kyung Gook Cho, Min Su Kim, Dong Hyun Park, Keun Hyung Lee*

¹Department of Chemistry and Chemical Engineering, Education and Research Center for Smart Energy and Materials, Inha University, Incheon, Korea



ABSTRACT

We demonstrate all-printed, low-voltage, and flexible electrolyte-gated transistors and inverters prepared through a facile spray-printing process. All active components of the electronic circuits, including source/drain electrodes, semiconductor, gate dielectric, gate electrode, and load resistor, were directly deposited via spray printing. The sprayed transistors show a high on/off ratio of $\sim 10^4$. The printed devices also show excellent operational stability under successive bending stresses, maintaining 88% of their performance after 5,000 bending cycles at a small bending radius of 2 mm. Furthermore, the resistor-loaded flexible inverters exhibit appropriate rail-to-rail voltage inverting characteristics with a high voltage gain of ~ 9 at a low supply voltage of -1 V. These results demonstrate that the high-throughput strategy is promising for generating low-voltage, flexible, and all-spray-printed electronic circuits.

Key Words: Spray printing, Electrolyte-gated transistors and inverters, Flexible electronics, Low-voltage operation

*Correspondence: kh.lee@inha.ac.kr



1. 서론

코로나 바이러스(COVID-19)의 대유행 이후 비대면/온라인 콘텐츠의 확산으로 시간과 공간의 제약을 극복할 수 있는 가상현실(VR), 증강현실(AR), 온라인/모바일 헬스케어 등의 기술이 큰 주목을 받고 있으며, 이와 관련된 웨어러블 전자소자 및 기기의 개발이 활발하게 진행되고 있다[1-3]. 신체의 움직임에 따라 변형될 수 있는 기계적 유연성은 웨어러블 전자소자로 활용되기 위한 가장 핵심적인 특성이기 때문에 전자기기의 회로를 구성하는 트랜지스터[4], 슈퍼커패시터[5], 센서[6] 등을 유연화 하는 연구가 활발하다. 웨어러블 전자기기를 위한 트랜지스터 소자로는 전해질-게이트 트랜지스터(electrolyte-gated transistors, EGTs) 시스템이 큰 주목을 받고 있으며, 특히 전해질 유전체(electrolyte dielectric) 층으로 3차원 구조의 고분자 네트워크에 이온성 액체가 함침되어 있는 고체 상태의 이온젤(ion gel)이 많이 활용되고 있다[7-9]. 웨어러블 전자소자를 위한 이온젤 기반의 EGTs는 1) 이온젤 고분자 전해질의 우수한 기계적 유연성으로 인해 소자 유연화에 용이하며, 2) 반도체 계면에서 전기이중층을 형성하여 $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 이상의 매우 높은 전기용량을 가지며, 이를 기반으로 수 V 수준의 매우 낮은 작동전압 범위에서 10^4 수준의 높은 전류 점멸비를 보인다[10-12]. 뿐만 아니라, 3) 반도체/유전체/게이트전극의 수직적인 적층 구조에서 벗어나 게이트 전극의 배치를 유연하게 함으로써 다양한 소자 구조 구현이 가능한 장점을 가지고 있다[13].

용액 기반의 프린팅 기법을 활용하여 소자를 제작하는 연구는 웨어러블 전자기기의 저비용·대면적 공정을 위해 매우 중요하다[14]. 따라서 잉크젯 프린팅(ink-jet-printing)[15], 에어로졸 젯 프린팅(aerosol-jet-printing)[16], 전사 프린팅(transfer-printing)[17], 스프레이 프린팅(spray-printing)[18], 일렉트로하이드로 다이나믹 젯 프린팅(electrohydrodynamic-jet printing)[19]

등의 기법들을 활용하여 이온젤 기반 EGTs를 제작하는 연구들이 활발하게 보고되고 있다. 하지만, 많은 논문들이 EGT 소자의 활성층 박막 형성을 위주로 프린팅 기법을 활용하고 있는 한계가 있다. 실제적으로 저비용·대면적 공정을 실현하기 위해서는 소스/드레인/게이트 전극, 반도체, 이온젤 유전체를 포함한 모든 활성층을 프린팅 기법으로 적층하여 고성능 소자를 구현하는 연구가 더욱 필요하다.

본 논문에서는 대면적/초고속/저비용 공정이 가능하며, 다양한 소재의 코팅에 용이하여 산업적으로 활발하게 사용되고 있는 스프레이 공정을 활용하여 논리회로를 구현하였다. 구체적으로 소스/드레인/게이트 전극, 고분자 반도체, 이온젤 전해질, 인버터용 로드 저항(resistor)을 포함한 모든 활성층을 스프레이 프린팅 기법을 활용하여 적층하였으며, 성공적으로 웨어러블 전자기기를 위한 EGTs 및 이를 기반으로 한 인버터 소자를 제작하였다(Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)). 제작된 p타입 EGT소자는 1 V 이하의 매우 낮은 전압에서 약 10^4 의 높은 전류점멸비를 보였으며, 5,000번의 굽힘 테스트에서도 소자 성능을 88% 이상 유지하는 우수한 유연성을 보여주었다. 더 나아가, P타입 EGT소자와 저항을 직렬로 연결한 유연 인버터 소자는 -1 V의 공급 전압(V_{DD})에서 약 9의 높은 전압 gain을 보이며 우수한 전압 반전 특성을 보여주었다. 이러한 결과들은 미래 웨어러블 전자기기를 위한 프린팅 기반 저전압 작동 및 유연 트랜지스터를 위한 방향성을 제시해준다.

2. 연구방법

2.1. 재료

SWCNT(single-wall carbon nanotube)는 Meijo Nano Carbon에서 구매하였으며, M(multi)WCNT는 CNT Co., Ltd에서 구매하였다. 랜덤 공중합체인 poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)(P(VDF-

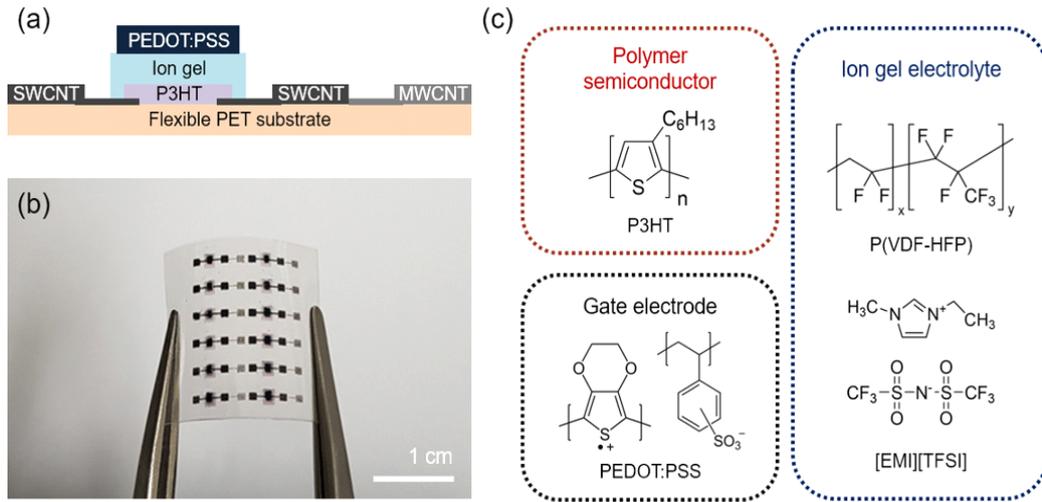


Fig. 1. (a) Cross-sectional schematic and (b) an optical image of the spray-printed inverters based on p-type EGT and MWCNT resistor. (c) Chemical structures of P3HT used as the semiconductor layer, P(VDF-HFP) and [EMI][TFSI] that constitute the ion gel dielectric layer, and PEDOT:PSS gate electrode.

HFP)), 이온성 액체인 1-ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl)imide ([EMI][TFSI]), dimethylformamide (DMF), 아세톤(acetone), 클로로포름(chloroform)은 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. p타입 고분자 반도체인 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)는 Rieke Metals에서, 고전도성 고분자인 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate)(PEDOT:PSS, Clevis PH 1000)는 Heraeus에서 구매하였다.

2.2. 잉크 제작

소스/드레인 전극용 SWCNT 기반 잉크는 SWCNT 8 mg, [EMI][TFSI] 8 mg, P(VDF-HFP) 8 mg을 DMF 용매 15 mL에 녹여 준비하였으며, SWCNT대신 MWCNT를 사용하여 저항용 잉크를 준비하였다. 준비된 소스/드레인 전극 및 저항용 잉크는 바-소닉(bar-sonic)으로 1시간 동안 분산시켜주었다. 반도체 잉크는 P3HT를 1 mg/mL의 농도로 클로로포름 용매에 녹여 만들어 주었다. 이온 젤 잉크는 P(VDF-HFP), [EMI][TFSI], 아세톤을 1:9:40의 중량 비율로 혼합하여 얻었다. 게이트 전극용 잉크는 PEDOT:PSS 용액 1 mL를 증류수 0.5

mL에 희석하여 준비하였다.

2.3. 인버터 소자 제작

스프레이 프린팅은 에어브러시(노즐 크기: 250 μm)를 활용하였으며, 각 활성층에 맞게 디자인된 스테인리스 스틸 마스크를 사용하여 수행되었다. 먼저, 소스/드레인 전극용 잉크를 유연한 poly(ethylene terephthalate)(PET) 투명 기판 위에 프린팅해주어 100 μm 의 길이와 1,000 μm 의 폭을 갖는 채널을 형성하였다. 이때, 기판 온도는 130 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되었다. 다음으로는, 저항용 잉크를 같은 조건에서 도포하여 드레인 전극에 연결된 저항을 만들어 주었다. 이어서 고분자 반도체 잉크, 이온 젤 잉크, 게이트 전극 잉크를 순서대로 50 $^{\circ}\text{C}$ 의 기판 온도에서 적층해 주었다. 소자 제작 후 남은 용매를 제거해 주기 위해 50 $^{\circ}\text{C}$ 의 진공 오븐에서 하룻밤 동안 건조하였다. 모든 스프레이 프린팅은 상온 공기 중에서, 1.5 bar의 질소 캐리어 가스의 압력에서 수행되었다.

2.4. 스프레이 프린팅된 박막 및 소자 분석

박막의 표면 이미지는 scanning electron microscopy



(SEM, JEOL JCM-5000 SE) 및 atomic force microscopy(AFM, NanoFocus n-Tracer)를 이용하여 얻었다. EGT 및 인버터 측정은 상온 공기중 에서 17 mV/s의 전압 훑음율(sweep rate)로 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1(c)는 반도체 층으로 사용한 p타입 고분자 반도체인 P3HT, 전해질 유전체 층으로 사용한 이온젤을 구성하는 P(VDF-HFP)와 [EMI][TFSI], 게이트 전극으로 사용한 고전도성 고분자인 PEDOT:PSS의 분자구조를 나타낸다. 먼저, 소스/드레인 전극으로는 전기전도성이 우수한 SWCNT를 활용하였으며, 상대적으로 전기전도성이 떨어지는 MWCNT를 활용하여 인버터 회로 구성을 위한 약 80 kΩ의 저항을 만들어 주었다. 고분자 반도체로 사용된 P3HT는 이온성 액체가 침투하여 3차원 채널을 형성하기 용이하기 때문에, 낮은

구동 전압에서 많은 양의 전하 운반체(charge carrier), 즉 높은 전류를 얻을 수 있다[10]. 상분리된 고분자 결정이 가교점을 형성하는 물리적 가교(physical cross-linking) 기반의 이온젤은 P(VDF-HFP)와 [EMI][TFSI] 이온성 액체로 이루어지며, EGT소자의 전해질층으로써 우수한 유연성과 높은 정공축적 능력을 보여준다[20]. 마지막으로, PEDOT:PSS는 유연성뿐만 아니라, 계면에서 높은 정전 용량을 보여주기 때문에 게이트 전극으로 적절하다[21].

Fig. 2(a)의 그림은 본 연구에서의 적용한 스프레이 프린팅 기법을 기반으로 한 인버터 소자 제작 과정을 보여준다. 유연한 PET기판 위에 먼저 소스/드레인 전극을 마스크를 이용하여 도포함으로써 채널 구조를 형성해 주었으며, 이어서 드레인 전극에 연결된 저항을 프린팅해 주었다. 다음으로는, P3HT(두께: 약 50 nm), 이온 젤(두께: 약 80~120 μm), PEDOT:PSS(두께: 약 20 μm) 층을 순서대로 스프레이 프린팅을 기반으로

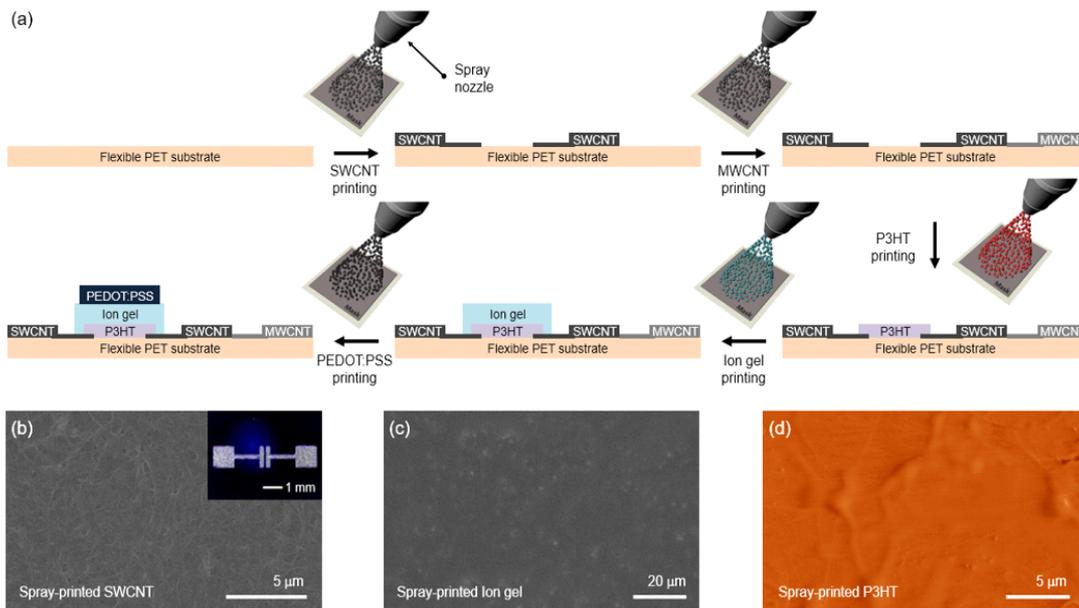


Fig. 2. (a) Schematic procedure for fabricating spray-printed inverters on a flexible PET substrate. SEM images of a spray-printed (b) SWCNT-based electrode (inset shows an enlarged image of the source/drain electrodes) and (c) an ion gel gate dielectric. (d) An AFM image of the spray-printed P3HT semiconductor.



적층해주었다. 이온 젤 잉크의 용매로는 P3HT가 녹지 않는 아세톤을 사용해 주고, PEDOT:PSS의 용매로는 이온젤을 녹이지 않는 증류수를 사용해 주어 적층 과정에서 아래 활성층에 데미지를 주지 않도록 공정과정을 디자인하였다. 또한, 모든 공정 과정을 최대 130°C 이하의 비교적 낮은 온도에서 진행해 주었으며, 이는 고온 공정이 포함되지 않음으로써 고분자를 활용하는 다양한 유연 전자소자 제작에 스프레이 프린팅 공정의 활용 가능성이 높다는 것을 보여준다.

Fig. 2(b)의 SEM 이미지를 통해서 스프레이 프린팅된 소스/드레인 전극의 잘 연결되어 있는 SWCNT를 확인할 수 있으며, 이를 통해 전극의 전기전도도가 우수할 것임을 알 수 있다. Fig. 2(c)의 SEM 이미지를 통해서 스프레이 프린팅된 이온 젤이 수 μm 크기의 크리스탈이 포함된 물리적 가교 네트워크로 구성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 2(d)의 AFM 이미지는 스프레

이 프린팅된 P3HT의 균일한 표면을 보여준다. 표면 거칠기를 의미하는 root mean square roughness 값은 약 2 nm로, 일반적으로 활용하는 스핀 코팅 공정으로 도포된 P3HT의 표면 거칠기와 상응하는 결과이다 [22]. 중요하게는, 이러한 결과는 스프레이 프린팅된 P3HT의 결정성이 낮다는 것을 의미하고, 이는 유연한 기계적 성질을 보이는 비정질(amorphous) 영역이 많아지는 것이기 때문에 고분자 반도체 층의 유연성이 확보되었다고 판단할 수 있다. 또한, 이온의 도핑/디도핑을 방해할 수 있는 고분자 반도체 결정이 적게 형성되는 것은 전류 온/오프 사이의 이온의 전달 현상 차이에 의한 히스테리시스(hysteresis)가 적은 소자를 구현하는데 유리하다.

먼저, 스프레이 프린팅을 기반으로 제작된 p타입 EGT의 트랜지스터 성능 및 유연성을 평가하였다(Fig. 3). 낮은 드레인 전압($V_D = -0.1\text{ V}$) 조건에서 측정된 트

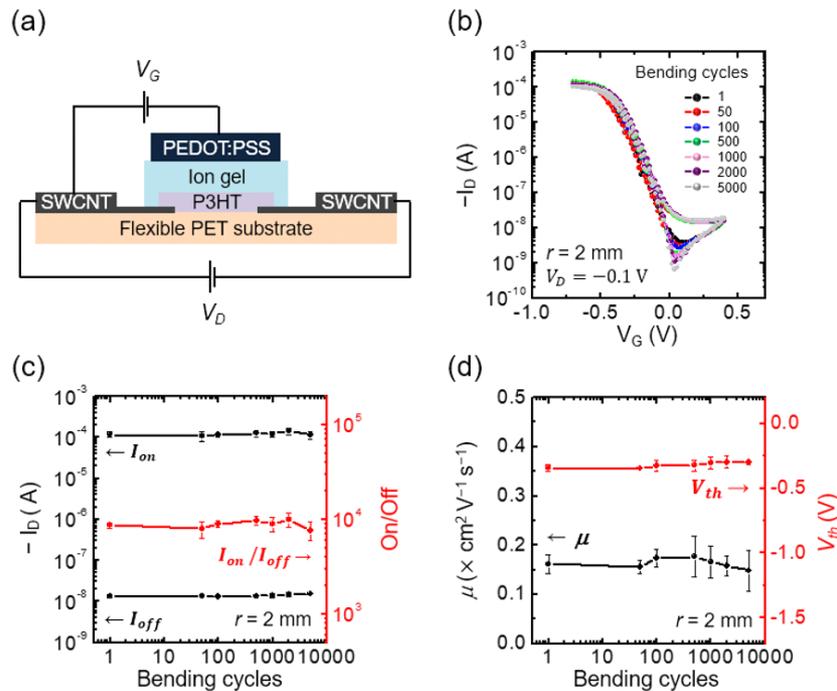


Fig. 3. (a) Cross-sectional schematic and (b) I_D - V_G transfer curves under repeated application of bending stress (5,000 cycles) at a bending curvature radius, r , of 2 mm for a spray-printed P3HT EGT. (c) Variation of I_{on} , I_{off} , and on/off current ratio, and (d) mobility (μ) and threshold voltage (V_{th}) as a function of bending cycles.



랜스퍼(I_D - V_G , I_D 는 채널전류, V_G 는 게이트 전압) 곡선은 V_G 를 정방향 및 역방향으로 스윙할 때 낮은 I_D 히스테리시스 및 낮은 V_D 및 V_G 값에서의 적절한 선형 응답을 보여준다. 특히, 이온 젤 게이트 절연체의 큰 정전 용량을 기반으로 약 -0.7 V의 낮은 V_G 값에서 약 10^{-4} A의 우수한 온-전류 값을 보여주었다. 더 중요하게는, 2 mm의 굽힘 반경(r)에서 실시한 5,000번의 굽힘 테스트 이후에도 I_D - V_G 곡선이 거의 변하지 않았다. 더 나아가, 대표적인 트랜지스터 수치들을 활용해 정량적으로 유연성을 평가해 보았다(Fig. 3(c) 및 Fig. 3(d)). 2 mm의 굽힘 반경(r)에서 5,000번의 물리적 굽힘 이후에도 온/오프 전류는 초기 대비 88%를 유지하였으며, 문턱 전압(V_{th})는 -0.04 V만 이동하였다. 또한, P3HT채널의 전하이동도는 92% 유지하는 우수한 유연성을 보여주었다.

Fig. 4에서는 스프레이 프린팅을 기반으로 제작된 인버터 소자의 전압 반전 성능을 평가하였다. Fig. 4(a)는 p타입 EGT 소자와 약 80 k Ω 저항이 직렬로 연결된 등가회로와 우수한 입력 및 출력 전압 반전 성능을 보여주며, 이는 낮은 히스테리시스를 갖는 p타입 P3HT EGT의 우수한 성능에 기반한다. 입력 전압(V_{in})이 음수일 때 p형 EGT가 켜지면서 회로 출력 전압(V_{out})이 0 V에 가깝게 되며, 양수의 V_{in} 에서는 P3HT EGT가 꺼지고, V_{out} 이 V_{DD} 값에 가까워졌다. 전압의 전환은 매우 작은 V_{in} 범위인 0.2 V내에서 완료되었으며, 전압 gain ($\partial V_{out}/\partial V_{in}$) 값은 각각 -0.5 , -0.75 및 -1 V의 세가지 다른 V_{DD} 에서 3.5, 6 및 9로 각각 나타났다(Fig. 4(b)).

4. 결론

저전압에서 작동하는 유연한 EGT 및 인버터 소자가 간편하고 고효율의 스프레이 프린팅 공정을 기반으로 성공적으로 제조되었다. 소스/드레인/게이트 전극, 저항, 반도체, 게이트 유전체 활성층이 모두 스프레이

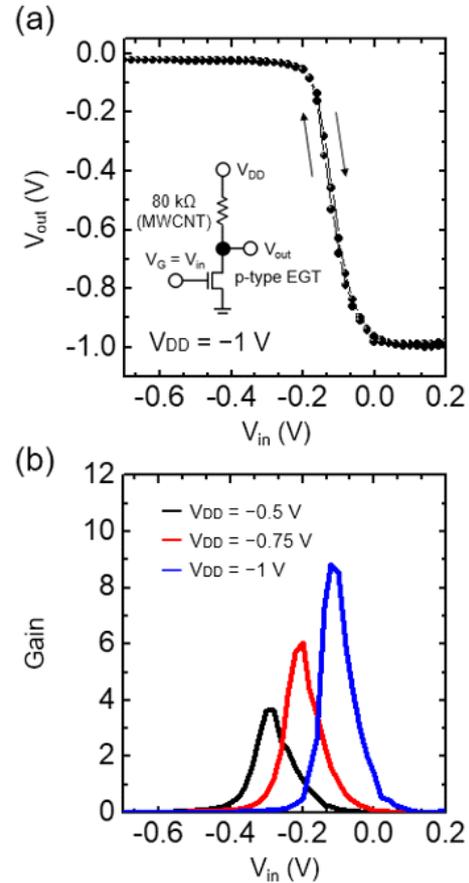


Fig. 4. (a) V_{in} vs. V_{out} obtained at a V_{DD} of -1 V for the spray-printed inverter (inset shows the equivalent circuit diagram). (b) Voltage gain at three different V_{DD} values of -0.5 , -0.75 , and -1 V.

프린팅 기법을 활용해 도포되었으며, 스테인리스 스틸 마스크를 이용하여 알맞게 패터닝되었다. 완전히 인쇄된 P3HT EGT는 낮은 전압에서 작동하며 높은 온/오프 비율 및 전하이동도를 보여주었으며, 더 나아가 2 mm의 작은 굽힘 반경의 5,000번 굽힘 테스트에서 약 88% 이상의 성능을 유지하는 우수한 유연성이 증명되었다. 유연한 EGT와 저항이 직렬로 연결된 인버터 소자는 무시할 만한 히스테리시스와 매우 낮은 공급 전압에서 높은 전압 반전 성능을 성공적으로 보여주었다. 전반적으로 이러한 결과는 고성능 웨어러블 전자기기를 위



한 저전압/유연 트랜지스터와 로직회로 개발의 방향성을 제시할 뿐만 아니라, 효과적이고 간편한 제조 기술로써 스프레이 프린팅 공정의 잠재력을 보여준다.

기호설명

EGTs: Electrolyte-gated transistors
SWCNT: Single-wall carbon nanotube
MWCNT: Multi-wall carbon nanotube
[EMI][TFSI]: 1-Ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethyl sulfonyl)imide
P(VDF-HFP): Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)
P3HT: Poly(3-hexylthiophene)
PEDOT:PSS: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate)
SEM: Scanning electron microscope
AFM: Atomic force microscope

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

KGC and DHP conducted experiments. KGC, MSK, DHP and KHL conducted analysis, discussion, and preparation of the manuscript.

Funding

This research was also partially supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (Ministry of Science and ICT,MSIT) (RS-2023-00247977 and 2021 R1A2C1094911).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing

interests.

REFERENCES

- [1] Pyun, K. R.; Rogers, J. A.; Ko, S. H. Materials and Devices for Immersive Virtual Reality. *Nat. Rev. Mater.* 2022, 7 (11), 841-843.
- [2] Ma, Y. J.; Zhang, Y. C.; Cai, S. S.; Han, Z. Y.; Liu, X.; Wang, F. L. et al. Flexible Hybrid Electronics for Digital Healthcare. *Adv. Mater.* 2020, 32 (15), 1902062.
- [3] Trung, T. Q.; Lee, N. E. Flexible and Stretchable Physical Sensor Integrated Platforms for Wearable Human-Activity Monitoring and Personal Healthcare. *Adv. Mater.* 2016, 28 (22), 4338-4372.
- [4] Liu, K.; Ouyang, B.; Guo, X. J.; Guo, Y. L.; Liu, Y. Q. Advances in Flexible Organic Field-Effect Transistors and Their Applications for Flexible Electronics. *Npj Flex. Electron.* 2022, 6 (1), 1.
- [5] Cho, K. G.; Kim, H. S.; Jang, S. S.; Kyung, H.; Kang, M. S.; Lee, K. H. et al. Optimizing Electrochemically Active Surfaces of Carbonaceous Electrodes for Ionogel Based Supercapacitors. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30 (30), 2002053.
- [6] Cho, K. G.; An, S.; Cho, D. H.; Kim, J. H.; Nam, J.; Kim, M. et al. Block Copolymer-Based Supramolecular Ionogels for Accurate On-Skin Motion Monitoring. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31 (36), 2102386.
- [7] Cho, J. H.; Lee, J.; Xia, Y.; Kim, B.; He, Y. Y.; Renn, M. J. et al. Printable Ion-Gel Gate Dielectrics for Low-Voltage Polymer Thin-Film Transistors on Plastic. *Nat. Mater.* 2008, 7 (11), 900-906.
- [8] Wang, D. P.; Zhao, S. F.; Yin, R. Y.; Li, L. L.; Lou, Z.; Shen, G. Z. Recent Advanced Applications



- of Ion-Gel in Ionic-Gated Transistor. *NPJ Flex. Electron.* 2021, 5 (1), 13.
- [9] Choi, Y.; Oh, S.; Qian, C.; Park, J. H.; Cho, J. H. Vertical Organic Synapse Expandable to 3D Crossbar Array. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1), 4595.
- [10] Kim, S. H.; Hong, K.; Xie, W.; Lee, K. H.; Zhang, S. P.; Lodge, T. P. et al. Electrolyte-Gated Transistors for Organic and Printed Electronics. *Adv. Mater.* 2013, 25 (13), 1822-1846.
- [11] Lee, S. J.; Cho, K. G.; Jung, S. H.; Kim, S.; Lee, J. K.; Lee, K. H. High-Mobility Low-Hysteresis Electrolyte-Gated Transistors with a DPP-Benzotriazole Copolymer Semiconductor. *Macromol. Res.* 2020, 28 (7), 683-687.
- [12] Cho, K. G.; Cho, Y. K.; Kim, J. H.; Yoo, H. Y.; Hong, K.; Lee, K. H. Thermostable Ion Gels for High-Temperature Operation of Electrolyte-Gated Transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12 (13), 15464-15471.
- [13] Torricelli, F.; Adrahtas, D. Z.; Bao, Z. N.; Berggren, M.; Biscarini, F.; Bonfiglio, A. et al. Electrolyte-Gated Transistors for Enhanced Performance Bioelectronics. *Nat. Rev. Methods Primers.* 2021, 1 (1), 66.
- [14] Khan, Y.; Thielens, A.; Muin, S.; Ting, J.; Baumbauer, C.; Arias, A. C. A New Frontier of Printed Electronics: Flexible Hybrid Electronics. *Adv. Mater.* 2020, 32 (15), 1905279.
- [15] Hyun, W. J.; Secor, E. B.; Rojas, G. A.; Hersam, M. C.; Francis, L. F.; Frisbie, C. D. All-Printed, Foldable Organic Thin-Film Transistors on Glassine Paper. *Adv. Mater.* 2015, 27 (44), 7058-7064.
- [16] Cho, K. G.; Adrahtas, D. Z.; Lee, K. H.; Frisbie, C. D. Sub-Band Filling and Hole Transport in Polythiophene-Based Electrolyte-Gated Transistors: Effect of Side-Chain Length and Density. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33 (37), 2303700.
- [17] Lee, D.; Cho, K. G.; Seol, K. H.; Lee, S.; Choi, S. H.; Lee, K. H. Low Voltage, High Gain Electrolyte-Gated Complementary Inverters based on Transfer-Printed Block Copolymer Ion Gels. *Org. Electron.* 2019, 71, 266-271.
- [18] Cho, K. G.; Kwon, Y. K.; Jang, S. S.; Seol, K. H.; Park, J. H.; Hong, K. et al. Printable Carbon Nanotube-Based Elastic Conductors for Fully-Printed Sub-1 V Stretchable Electrolyte-Gated Transistors and Inverters. *J. Mater. Chem. C.* 2020, 8 (11), 3639-3645.
- [19] Jung, E. M.; Lee, S. W.; Kim, S. H. Printed Ion-Gel Transistor using Electrohydrodynamic (EHD) Jet Printing Process. *Org. Electron.* 2018, 52, 123-129.
- [20] Lee, K. H.; Kang, M. S.; Zhang, S. P.; Gu, Y. Y.; Lodge, T. P.; Frisbie, C. D. "Cut and Stick" Rubbery Ion Gels as High Capacitance Gate Dielectrics. *Adv. Mater.* 2012, 24 (32), 4457-4462.
- [21] Cho, K. Y.; Lee, K. H.; Frisbie, C. D. Tuning Gate Potential Profiles and Current-Voltage Characteristics of Polymer Electrolyte-Gated Transistors by Capacitance Engineering. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2024, 16 (15), 19309-19317.
- [22] Cho, K. G.; Kim, H. J.; Yang, H. M.; Seol, K. H.; Lee, S. J.; Lee, K. H. Sub-2 V, Transfer-Stamped Organic/Inorganic Complementary Inverters Based on Electrolyte-Gated Transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2018, 10 (47), 40672-40680.