



REVIEW

자극을 감지하는 센서와 신호를 시각화하는 디스플레이가 통합된 사용자 상호적 디스플레이

김예원^{1,2*}, 최문기^{1,2*}

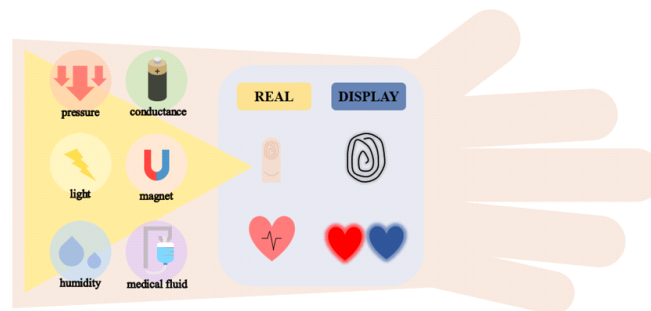
¹울산과학기술원 신소재공학과, ²울산과학기술원 반도체소재·부품대학원, 미래반도체연구소

User-Interactive Display Integrating Stimuli-Detecting Sensors and Visualizing Displays

Yaewon Kim^{1,2}, Moon Kee Choi^{1,2*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea

²Graduate School of Semiconductor Materials and Devices Engineering, Center for Future Semiconductor Technology (FUST), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea



ABSTRACT

Wearable devices, which are currently widely used, are difficult to use because they are thick and hard. In order to solve this, a thin and flexible display is required. In addition, sensors which are combined with them respond to external stimuli, transmit signals to the device and display them. In this way, wearable devices are in a direction in which they interact in both ways rather than in a single way. Furthermore, instead of processing stimuli as signals and showing them on the display, devices that can react and represent changes in external stimuli immediately are being developed. As a step of process in information processing is reduced, the response time can be reduced and the device may be miniaturized and lightweight. In this paper, we will look at the display that responds to various types of external stimuli. Furthermore, we will introduce how a display can be utilized.

Key Words: Wearable device, Sensor, Display, External stimuli

*Correspondence: mkchoi@unist.ac.kr



1. 서론

현재까지 디스플레이의 기술 개발로 인해 디스플레이 폼팩터는 두껍고 단단한 형태에서 얇고 플렉서블한 형태로 개선되었으며, 동시에 사람 눈의 분해능을 넘어서는 고화질의 해상도를 달성했다[1]. 앞으로는 디스플레이가 단순히 영상 송출 장치를 넘어서 사람의 피부와 같이 부드럽고 유연하면서도 역동적으로 움직이는 표면에서 정보송출뿐 아니라 센서 기능을 통해 다양한 감각을 모사하는 전자피부와 같은 형태의 웨어러블 디바이스가 기대되고 있다[2-4].

이를 위하여 다양한 자극의 감지가 가능한 얇은 두께의 사용자 상호작용적 디스플레이(user-interactive display)의 구현이 필요하다[5]. 사용자 상호작용적 디스플레이는 센서와 디스플레이의 결합 방식에 따라 크게 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 먼저 개별 제작된 센서와 디스플레이를 하나의 서킷으로 통합시켜서, 센서가 자극을 감지하면 연결된 전자기기가 전기 신호를 시각 신호로 변환하여 디스플레이에 나타내는 기기가 있다[6]. 이러한 기기들의 특징은 신호 처리를 위한 별도의 하드웨어 서킷들이 필요하며 그 과정에서 필요한 유닛들의 수와 차지하는 공간이 증가한다. 두 번째로 디스플레이가 센서의 역할을 동시에 함으로써, 자극을 감지하면서도 시각적 정보도 같이 전달하는 형태의 사용자 상호작용적 디스플레이가 개발되고 있다[7]. 두 가지 기능을 하는 소자들이 하나의 소자로 통합되면, 정보 처리 통로의 수가 줄어들기 때문에 속도가 빨라지고, 필요한 소자의 개수가 줄어든다. 따라서 기기의 전반적인 크기가 줄어들게 되어 기기의 소형화와 경량화가 가능하게 된다[8].

본 논문에서는 별개의 센서와 디스플레이가 각각 합쳐진 소자가 아닌 하나의 소자가 두 가지 기능을 하는 디스플레이에 대해 소개할 것이다. 구체적으로 사용자 상호작용적 디스플레이가 감지할 수 있는 자극의 종류

에 따라 압력, 빛, 습도, 전도도, 자기장, 액체에 반응하는 디스플레이에 대해 심도있게 살펴볼 것이다. 더 나아가 각 자극에 반응하는 사용자 상호작용적 디스플레이가 현실에서 어떻게 활용될 수 있는지 그 용도에 대해 고찰할 것이다.

2. 자극 감지 디스플레이의 작동 원리

2.1. 압력 감지 디스플레이

FET를 기반으로 하는 대부분의 압력 센서는 소자구조가 복잡하며 공정 과정에서 제작 비용이 높다. 그리고 정확도가 높은 대신 압력 감지 범위가 제한적이다. 이를 해결하기 위해 카이스트 유승협 교수 연구팀에서는 Fig. 1(a)와 같이 공기 절연층이 있는 Si 트랜지스터를 OLED 픽셀과 결합한 형태를 사용하였다[9]. 절연층의 높이는 트랜지스터와 탑 게이트 사이의 탄성 증합체 분할 스페이서에 의해 결정된다. 압력이 증가하게 되면 이 스페이서의 높이는 감소하고, 금속-기체-Si의 정전 용량이 증가한다. 이러한 정전 용량의 변화를 이용해서 개별 Si FET는 하나의 압력 센서로 작용하게 되고, 이 센서는 Fig. 1(b)에서처럼 180 kPa부터 3 MPa까지의 넓은 범위의 압력을 감지할 수 있다.

연세대학교 박철민 교수 연구팀에서는 온도와 압력에 동시에 반응하는 tandem stimuli-interactive sensing display(TSSD)를 보고했다[10]. 이 디스플레이는 온도에 반응하는 이온 고분자층, 푸른빛을 발광하는 유닛, 간격을 두고 서로 평행한 전도성이 있는 고분자 전극, 주황빛을 발광하는 유닛, 압력에 반응하는 층, 이렇게 총 5개의 층으로 구성되어 있다. Temperature-responsive ionic polymer layer(TRL)는 외부 온도가 증가하면 이온의 전도성이 증가하게 되고, pressure-responsive layer (PRL)는 마이크로돔 형태의 유닛에, 코팅된 PEDOT: PSS가 PRL에 닿는 면적이 증가하면서 임피던스가 감소하도록 설계되었다. 이때 평행한 두 전극

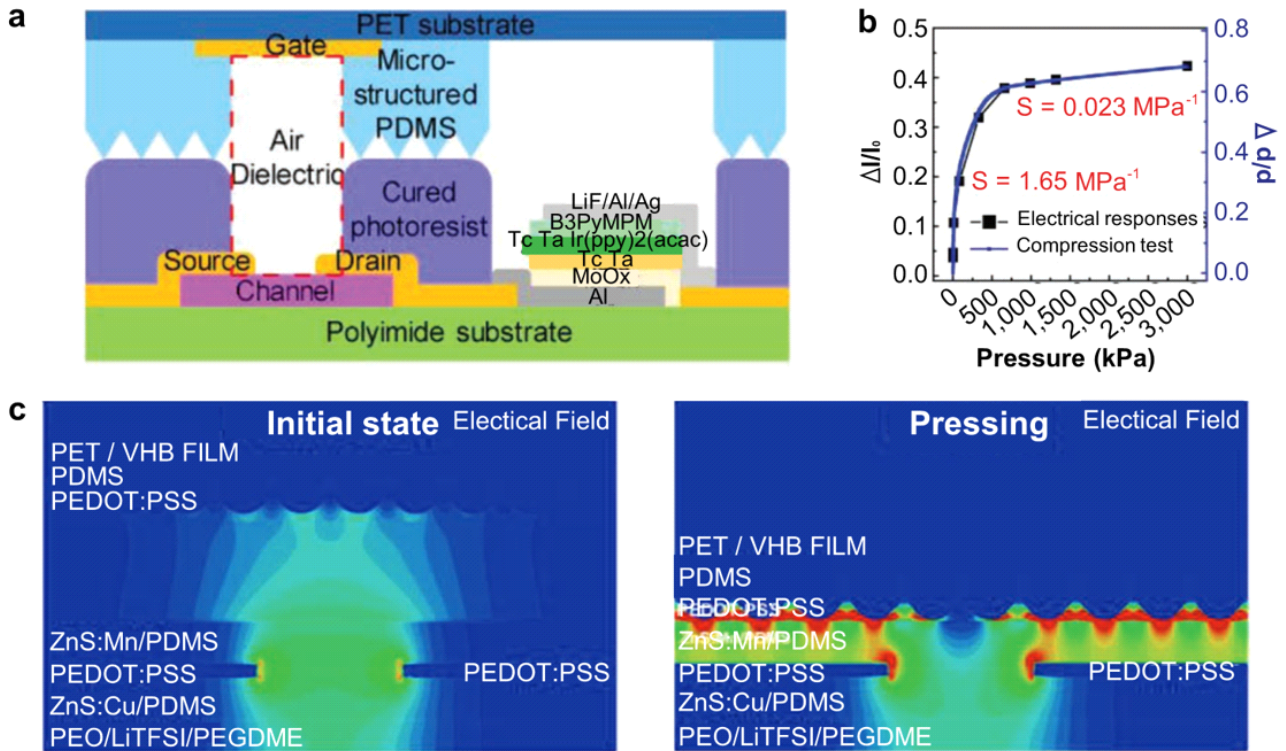


Fig. 1. (a) Schematic illustration of pressure-responsive device using the difference of capacitance. (b) Comparison of electrical responses of tactic pressure sensor and stress-strain curve of compression test of micro-structured PDMS. Adapted with permission from [9]. Copyright 2019, Wiley-VCH. (c) Electric field distribution of TSSD when unpressed (left) and pressed (right). Adapted with permission from [10]. Copyright 2021, Wiley-VCH.

사이에 교류가 가해지면, 서로 다른 임피던스를 가지고 있는 TRL과 PRL의 고분자는 주어진 자기장에서 각각 발광이 일어나게 된다. 그리고 Fig. 1(c)처럼 수직 방향의 전기장은 두 전극 사이에서 통제된다.

2.2. 빛 감지 디스플레이

Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에서 보이는 것처럼 콜로이드 성 나노막대형태의 QD에서 설계된 이중 헤테로접합 구조는 한 기기 내부에서 광 전류 발생과 EL을 가능하게 한다[11]. Double-heterojunction nanorods(DHNRs)는 Fig. 2(c)처럼 QD와 양 옆 두 물질 사이에 두 물질의 밴드 오프셋을 아우르는 밴드 오프셋과 빛이 발생하는 수송체의 효율적인 분리를 도와주는 엇갈리게 배

치된 밴드 오프셋이 있다. DHNR 구조는 빛의 아웃커플링(outcoupling)이 향상되고 독립적으로 통제가 가능하다는 이점이 있다. 즉 전하 분리와 재결합 장소 두 가지 역할을 동시에 수행할 수 있다. 이러한 물질을 이용하면 반응시간이 10 μs 이하이고, 교류에서 빛을 계속 내면서도 빛을 감지할 수 있다. Fig. 2(c)에서 바이어스를 순방향에서 역방향으로 바꾸면 하나의 광소자가 빛이 방출되는 모드(발광소자)와 빛이 감지되는 모드(수광센서)로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 발광소자의 EL은 30 nm 이하의 좁은 밴드 너비와 80,000 cd/m^2 이상의 높은 최대 밝기, 17 V 이하의 낮은 동작 전압의 특징을 보여주었다. 그리고 수광센서 모드에서 기존의 광 검출기보다 20배 높은 단락 전류를 보이며

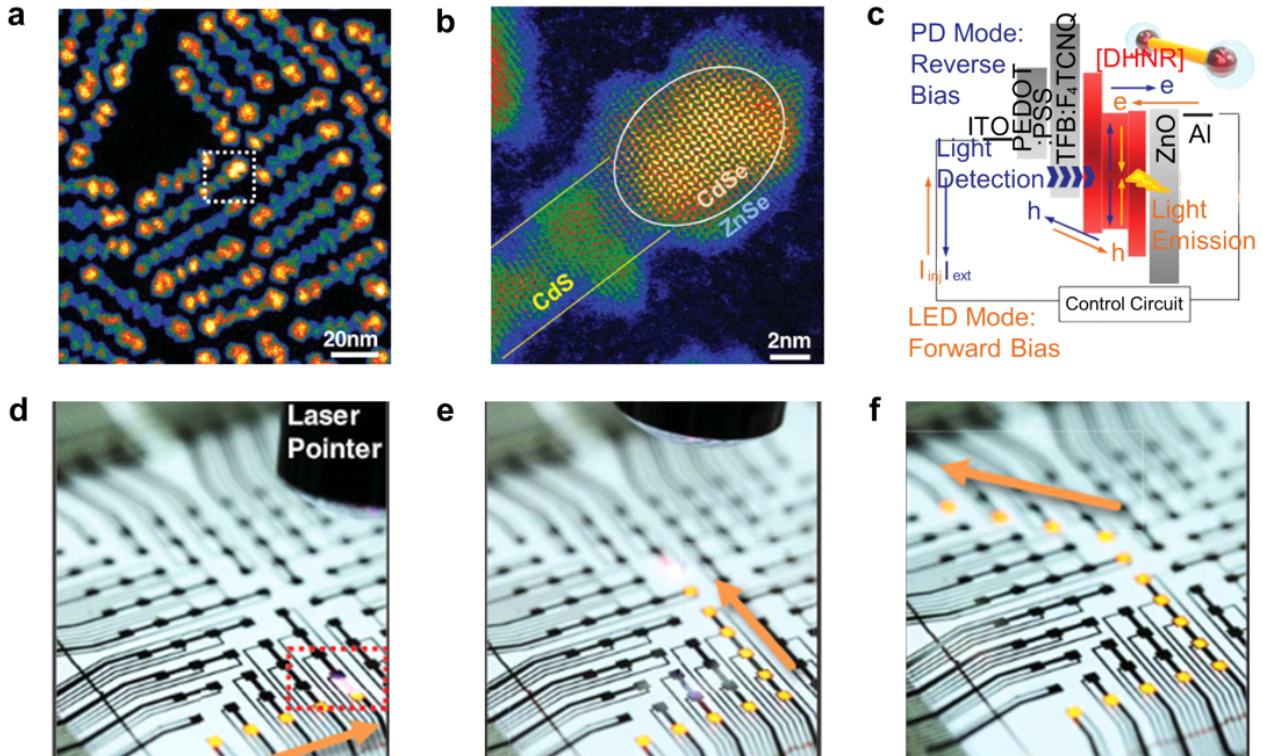


Fig. 2. (a) The image of scanning transmission electron microscopy of DHNR. (b) The enlarged image of inner dotted area in (a). (c) Schematic illustration of DHNR and energy band diagram of DHNR-LED which expresses charge flow with light emission and detection. (d-f) Responses of light emission and detection with migration of laser pointer. Adapted with permission from [11]. Copyright 2017, AAAS.

높은 성능을 보여주었다. 그렇기 때문에 Fig. 2(d)~ Fig. 2(f)처럼 디스플레이에 빛을 주게 되면 빛을 감지하는 동시에 감지되는 곳에서 빛을 방출하는 빛 감지 센서의 역할을 수행할 수 있다.

2.3. 습도 감지 디스플레이

강한 공진의 포토닉 구조와 역학적으로 반응하는 물질의 장점을 결합한 비색 센서(colorimetric sensor)가 있다[12]. Highly lossy resonant promoter(HLRP)을 기판으로 사용했고, 세균의 숙주 세포 감염을 통해 자가 복제가 가능한 M-13 박테리오파지를 이용하였다. 비색 장치는 습도에 민감한 구역과 민감하지 않은 구역으로 나뉘서 설계되었고, 높은 습도에서는 민감한 구

역의 숨겨진 패턴이 드러나면서 습도의 직관적인 인지가 가능하였다. Fig. 3(a)는 이 센서의 원리를 보여준다. 매우 얇은 박테리오파지 층은 복합 광학 상수를 가진 HLRP의 표면에서의 상호작용 때문에 강한 공진을 발생시킨다. 이에 따라 친수성의 파지 층이 있는 샘플은 상대 습도의 변화에 대해 분명한 색 변화를 만들었다. Fig. 3(b)는 습도에 따라 숨겨지거나 드러난 패턴이 있는 습도 장치의 도면이고, Fig. 3(c)는 HLRP의 두께에 따른 색변화를 보여주는 그래프이다. Fig. 3(d)는 석판술 과정에 의해 가공된 물방울 패턴의 습도 장치의 이미지를 보여준다. 파지가 코팅되어 있지 않은 HLRP는 색이 구분되긴 하지만, 습도가 낮을 때는 Fig. 3(e)에서 보이는 것처럼 두 구역에 비슷한 색이 나타난

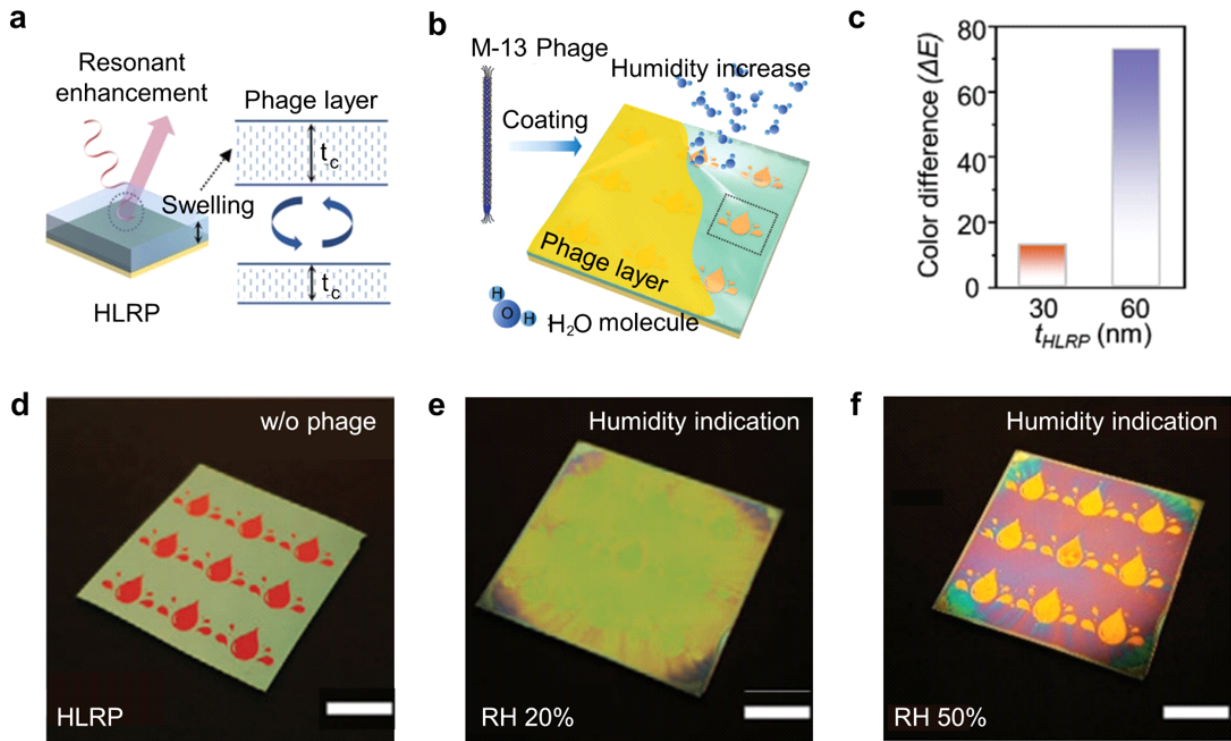


Fig. 3. (a) Schematic illustration of the resonance color reflection which shows swelling of phage layer and reflection spectra. (b) Colometric sensor which display sensitive/insensitive color change through bacteriophage coating. (c) Comparison of color difference of sensitive or insensitive region through thickness of HLRP. (d) The image of display before phage coating. (e) The image of display after phage coating. (f) The image of display when humidity is detected. Adapted with permission from [12]. Copyright 2020, Wiley-VCH.

다. 습도가 어느 정도 높을 때는 Fig. 3(f)에서 확인할 수 있듯이 민감하지 않은 부분의 색은 거의 변화가 없지만 민감한 부분에서는 색 변화가 분명하게 일어났다. 그리고 RH 20%와 RH 70%에서 습기 제거시 각각 110 ms와 190 ms의 빠른 회복 시간(recovery time)을 나타내어 실시간 습도 측정 가능성을 보여주었다.

2.4. 전기전도도 감지 디스플레이

고분자의 EL을 기반으로 한 자극 감지 디스플레이 기법은 다양한 전도성 정보의 감지와 시각화를 가능하게 한다[13]. 다양한 전도성 물질로 이뤄진 패턴은 물질 본연의 일함수와 관계없이 형태가 정확하게 감지되

어 명확하게 시각화되고, 전도성이 있는 손가락을 이용하면 지문 패턴 또한 감지가 된다. 매우 얇고 높은 색 대비를 보여주는 OLED를 활용한 하이브리드 박막 트랜지스터는 압력보다는 전도도에 더 민감하게 반응해서 공간 정보를 시각화한다. 이 organic light-emitting board(OLEB)는 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 SiO₂와 PEDOT:PSS, 발광층, PEI/ ZnO, 한 평면상에서 간격을 두고 분리되어 있는 두 개의 투명한 전극으로 구성되어 있다. OLEB에 포함되어 있는 전극 이외의 다른 전극이 SiO₂ 층 위에 있을 때 기기는 전극과 SiO₂가 중첩된 부분에서 빛을 낸다. 아래의 ITO에서 수송체가 주입되고, 교류가 두개의 전극 사이에 가해지게

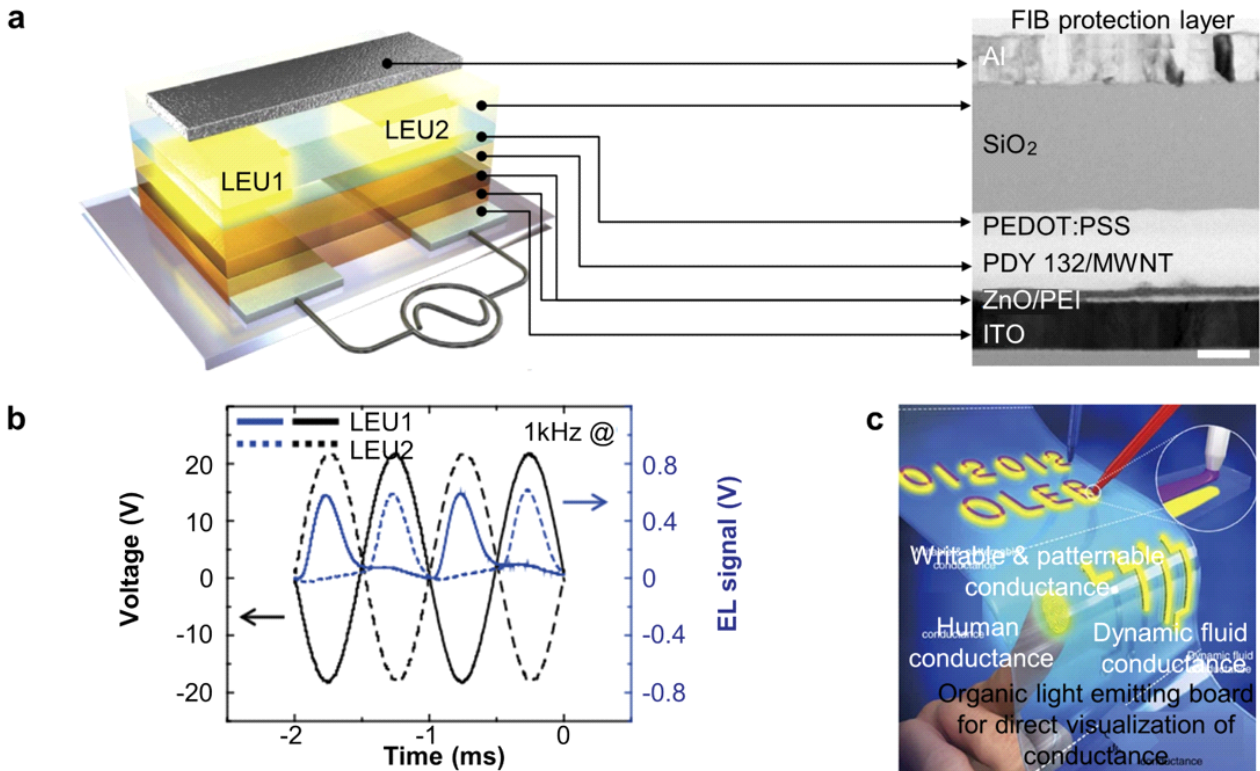


Fig. 4. (a) Schematic illustration of parallel AC EL device structure and image of cross-sectional TEM. (b) Resolved time EL signal of two light emitting units at 1 kHz. (c) Illustration of light emission using various type of conductive materials. Adapted with permission from [13]. Copyright 2017, Springer Nature.

되면 Fig. 4(b)처럼 두개의 발광 유닛은 SiO₂ 위에 있는 전극과 증착되어 EL이 순차적으로 반복해서 일어난다. EL은 최대 100 kHz에서 2,000 cd/m²의 밝기를 보여주었다. 이 기기의 가장 큰 장점은 빛 방출이 위의 전극 물질의 종류에 관계없이 일어난다는 것이다. 그렇기 때문에 자연적인 전도성을 가지고 있는 손가락이나 전도성이 있는 펜을 사용하면 Fig. 4(c)처럼 표면에 접촉한 지문의 모양 그대로 발광이 일어나면서 정보가 시각화된다.

2.5. 자기장 감지 디스플레이

자기장을 감지하는 디스플레이는 동물이나 곤충의 자기수용을 모방할 수 있고 물리적 접촉 없이 물체를

감지할 수 있어 비접촉 시스템에 적합하다. 연세대학교 박철민 교수 연구진에서 보고한 ACEL 디스플레이는 MWNTs의 자기 활성 전도성 액체와 초자성 Fe₃O₄의 나노입자를 사용하였다[14]. 자기 활성 전도성 채널이 외부 자기장에 의해 형성되어서 자기장 게이트로 역할을 하면 디스플레이는 ACEL 특성을 나타낸다. 전도성 채널의 임피던스가 감소하면 기기의 휘도는 증가하고, 자기장의 손쉬운 시각화가 일어난다. 그리고 반대 방향의 자기장을 사용해서 채널을 없애면 ‘지우기’의 기능이 된다. 또 다른 입력 자기장을 사용하면 새로운 EL, 즉 ‘쓰기’의 기능이 된다. 이는 비휘발성의 자기장에 반응하는 EL display(non-volatile magneto-interactive EL display, NV-MED)를 재기록이 가능한

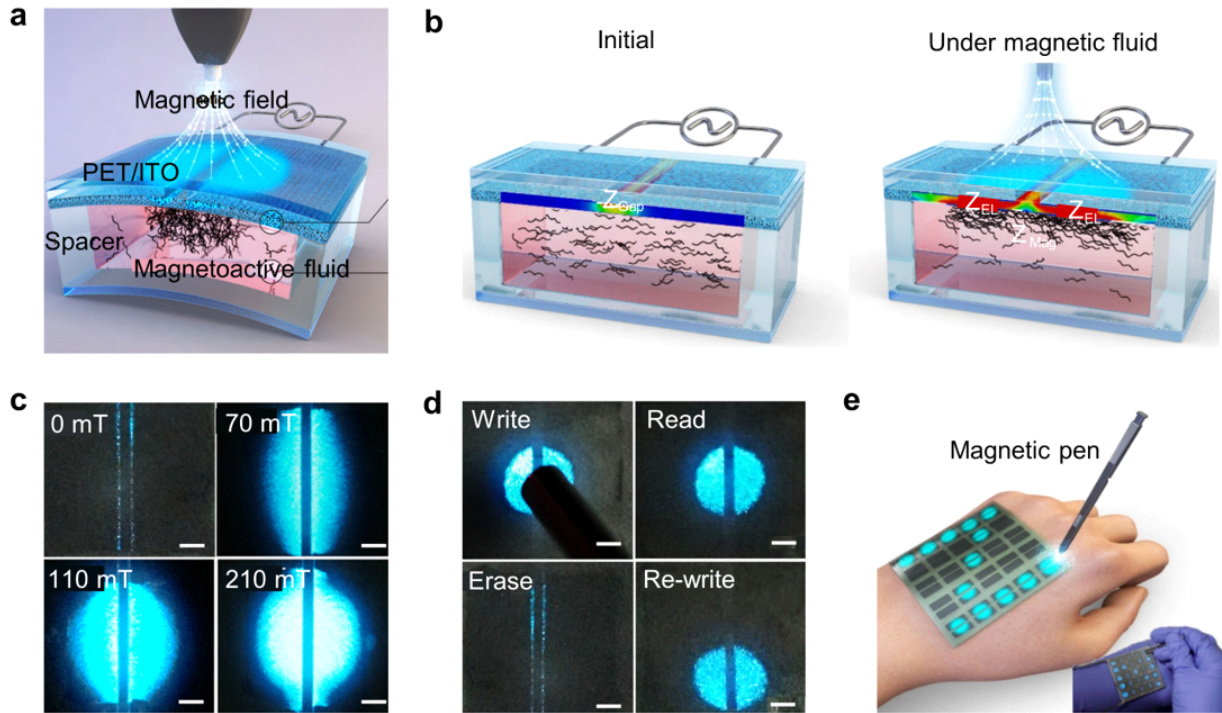


Fig. 5. (a) Schematic illustration of response that magnetoactive fluid between spacer is attracted by magnetoactive pen. (b) Change of magnetoactive material with the existence of magnetic field. (c) Comparison of the light intensity with different magnitude of magnetic field, respectively 0 mT, 70 mT, 110 mT, and 210 mT. (d) Process of ‘write’, ‘read’, ‘erase’ and ‘re-write’ using magnetic field. (e) Schematic illustration of responsive 5×5 array NV-MED with magnetic pen. Adapted with permission from [14]. Copyright 2020, Springer Nature.

기기로 만든다. Fig. 5(a)에서 구조를 더 자세히 보면 두 개의 한 평면상의 투명한 ITO/PET 전극 위에 ZnS:Cu/PVDF-TrFE-CFE가 있고, 발광층 위에 자성 액체의 양을 조절하는 스페이서 역할을 하는 VHB 아크릴 필름이 있다. Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)에서 외부 자기장이 NV-MED의 위에 수직으로 가해지면 이에 반응하는 Fe₃O₄-MWNTs는 자성의 근원 쪽으로 이동하고, 그렇기 때문에 발광층 바로 아래에서 전도성 채널이 증가한다. 증가한 채널은 떠 있는 전극의 역할을 하고 두 개의 평행한 전극 사이에 가해져 있던 수평의 전기장은 수직 방향으로 전환된다. Fig. 5(d)는 둥근 모양의 자석이 가까워졌을 때 ZnS:Cu에서 파란 빛을 방출했고 자기장의 세기가 증가할수록 더 밝은 빛이 방출되

었다는 것을 보여준다. Fig. 5(e)를 통해 가해진 자성에 따라 앞서 말했던 ‘쓰기’와 ‘읽기’, ‘지우기’, ‘다시 쓰기’의 기능을 할 수 있다는 것을 확인했다. Fig. 5(f)는 피부에 부착된 NV-MED 어레이에서 각각의 픽셀은 자성이 있는 막대나 펜을 이용하면 정보를 쓸 수 있다는 것을 보여주고, 기록된 정보는 임피던스와 EL로 나타나며 이는 수십 번 재활용이 가능하다.

2.6. 액체 감지 디스플레이

직접 용량식 결합(direct capacitive coupling)을 활용한 wireless stand-alone interactive display(WiSID)는 세 가지 층으로 구성된다. 한 평면 상의 일정 간격을 두고 분리되어 있는 두 개의 금속 전극과 유도 EL과

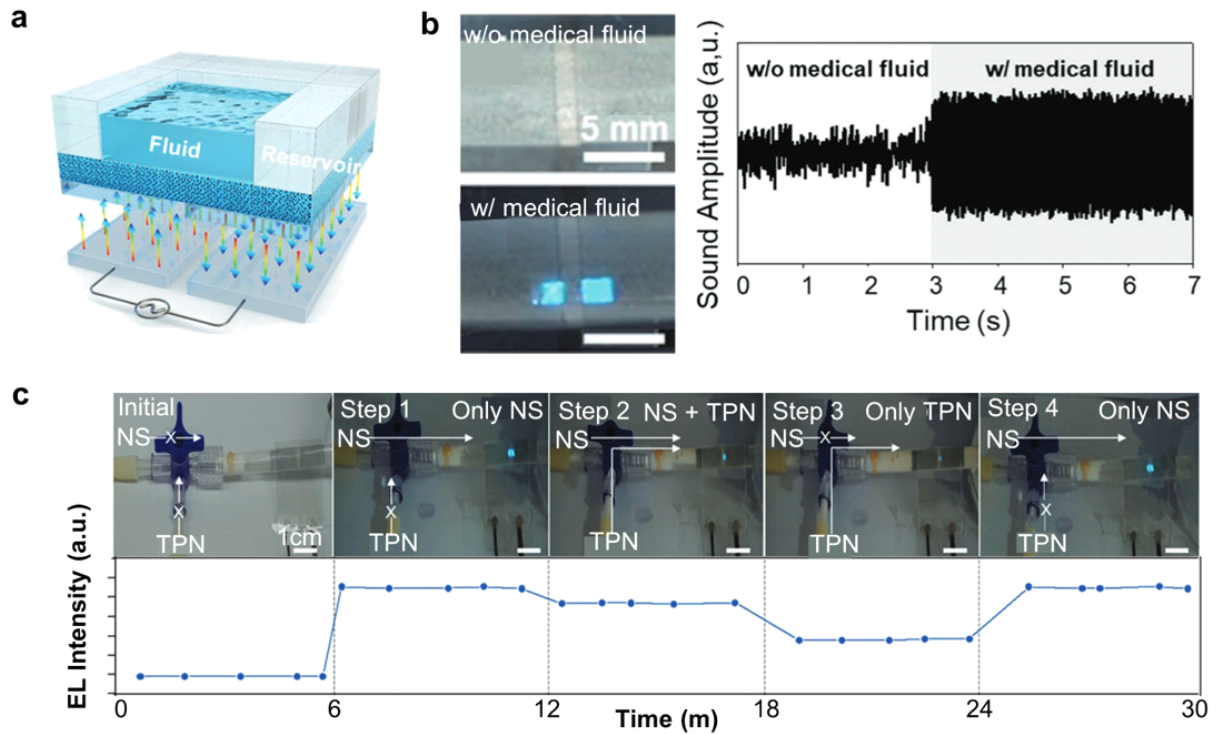


Fig. 6. (a) Schematic illustration of structure of WiSID applied alternated current. (b) The image of tube type of WiSID with medical fluid (left, top) and without medical fluid (left, bottom) and inversion piezoelectric sound measured by sound amplitude with time. (c) Field-induced EL intensity of whether or not NS or TPN is injected with 3-way medical connector with tube type of WiSID. Adapted with permission from [15]. Copyright 2022, Wiley-VCH.

역압전 소리를 위한 합성물층, 자극에 반응하는 층이 있다. 액체의 종류에 따라 고유 유전율이 다르기 때문에 각각의 액체의 임피던스는 다양한 크기의 수직 방향의 교류 전기장을 만들어내고, 액체의 종류에 따라 서로 다른 밝기와 SPL을 보여준다. Fig. 6(a)처럼 교류가 분리된 파워 유닛에 가해지게 되면 저장소 안에 액체가 있는 WiSID는 ACEL과 역압전 소리 모두를 내게 된다[15]. 이러한 특징을 활용해 의료용 액체를 감지할 수 있다. 유연한 교류 파워 유닛을 튜브 형태의 WiSID 연결시켰을 때 AC 진동수와 전압은 각각 10 kHz와 525 V였으며, 의료용 액체가 물리적 틈을 통과하면 극성의 통로가 형성되어 Fig. 6(b)처럼 빛과 소리를 내게 된다. Fig. 6(c)에서 보이는 것처럼 normal

saline(NS)와 total parenteral nutrition(TPN)의 주입을 위해 세 방향의 밸브를 두개의 주입 튜브와 연결해서 처음에 NS를 주입시키고 후에 TPN을 주입시켰을 때 임피던스는 명확히 구분되었다. NS의 임피던스가 작기 때문에 NS가 주입되었을 때 나오는 빛과 소리는 모두 TPN의 것보다 세기가 컸다. 그래서 이러한 특징을 활용하면 무선으로 실시간의 주입되는 액체에 대한 감지가 가능하다.

3. 사용자 상호작용적 디스플레이의 활용

3.1. 지문 인식 디스플레이

지문은 사생활 보호를 위해 자주 사용되는 보안 수



단이다. 여러 종류 중 정전식 지문 센서(capacitive fingerprint sensor)는 튀어나온 부분과 들어간 부분의 거리 때문에 변화하는 전기용량을 이용하여 지문의 이미지를 도출해낸다[16]. 이 종류의 센서는 대부분 불투명하기 때문에 별도의 활성 버튼을 이용하거나 디스플레이 제품의 뒤쪽에 위치한다는 단점이 있다. 울산과학기술원 박장웅 교수 연구진에서 보고한 지문인식 디스플레이에서는 투명하고 유연한 전극을 위해 은나노섬유(AgNFs)와 은나노와이어(AgNWs)를 기반으로 한 하이브리드 나노 구조의 랜덤 네트워크를 사용하여 지문 인식 디스플레이를 구현했다. 랜덤 네트워크 기반의 은나노센서는 89.05%의 투과도와 381 CPI의 특징을 보여주었다. Fig. 7(a)는 센서의 다기능을 위한 어레이의 도식이다. 압력 감지를 위해 채널과 위의 게이트 전극 사이에 절연층의 역할을 하는 공기로 차 있는 틈

이 FET를 제작했다. 다섯 개의 압력 센서는 네 개의 모서리와 배열의 중간에 있다. 그리고 모든 투명한 센서는 바깥 테두리 내부에 중앙의 투명한 부분에 위치하며 판독 회로(readout circuit)와 교차되어 있다. Fig. 7(b)는 어레이에서 정전용량 차이를 측정하는 방법을 묘사한다. 위쪽 표면에 손가락을 접촉시킨 다음 옆쪽으로 밀어서 변화를 측정한 결과, 지문의 골이 센서에 닿을 때 정전 용량은 100 fF에서 80 fF로 감소했으며 융선이 닿았을 때는 80 fF에서 76 fF로 감소하였다. Fig. 7(c)는 지문과 압력, 피부 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 손가락이 기기에 닿았을 때 골에 비해 융선에서 500 mV의 전압 강하가 일어났고 그와 동시에 압력과 피부 온도가 증가했다. 이렇게 활성 버튼 없이 AgNF-AgNW 하이브리드 전극을 사용해서 지문과 압력, 온도를 동시에 측정하는 지문 인식 투명 디스플레이

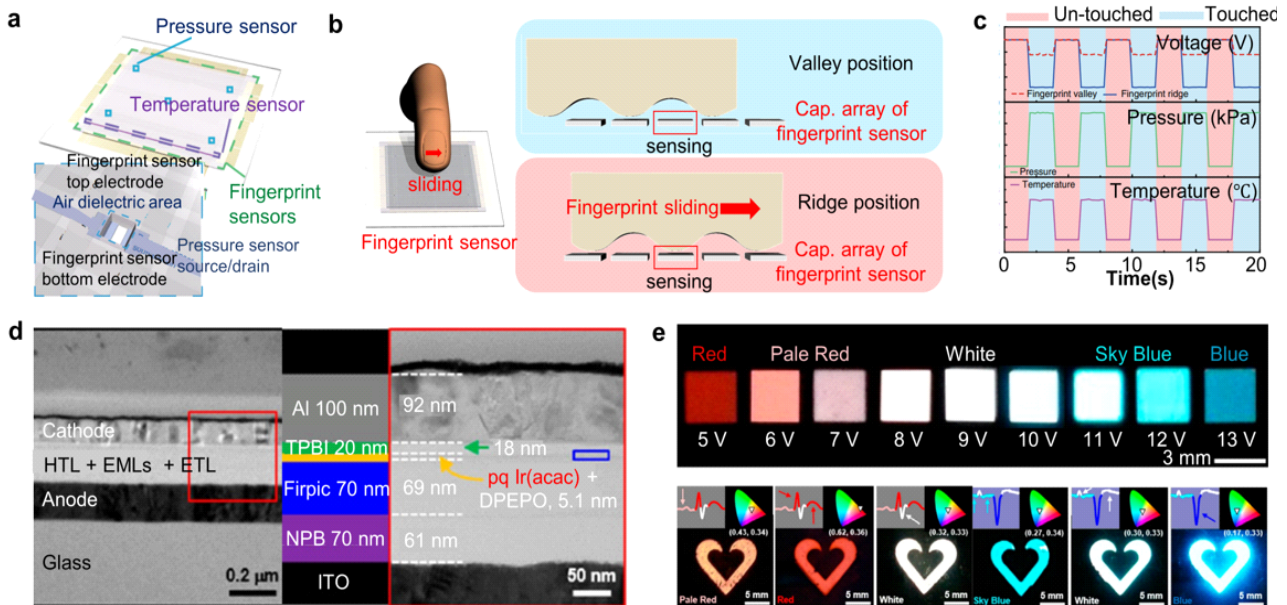


Fig. 7. (a) Schematic illustration of multiplexed fingerprint sensor structure. (b) Detection process of fingerprint with sliding of finger. (c) Change of voltage, pressure and temperature when finger is un-touched and touched. Adapted with permission from [16]. Copyright 2020, Springer Nature. (d) The TEM image of cross-sectional CTOLED. (e) Color difference of CTOLED with different voltage and ECG signal. Adapted with permission from [18]. Copyright 2020, American Chemical Society.



이로 사용할 수 있다.

3.2. 심박 측정 디스플레이

사용자의 건강상태를 실시간으로 확인하기 위해서 활력징후 중 하나인 심박수를 비침습적으로 측정하는 센서의 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 무기물을 사용한 심박 센서는 감지 능력의 한계와 생체적합성 이슈가 있기 때문에 유기물 기반의 심박 센서들이 개발되고 있다[17]. 서울대학교 김대형 교수 연구진은 매우 얇은 전극과 p-MOS CNT 신호 증폭기, 매우 얇은 전압에 좌우되는 CTOLED(color-tunable organic light-emitting diode)를 사용한 심박 측정 디스플레이를 보고하였다[18]. CTOLED는 두 발광층 사이에 EBL박막을 이용해 ECG에 좌우되는 색 변화를 보여준다. Fig. 7(d)는 ITO와 NPB(N,N'-di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine), CBP/10% FIrpic, DPEPO(bis[2-(diphenylphosphino)phenyl]etheroxide), pq2Ir(acac), TPBI(2,2',2''-(1,3,5-benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1H-benzimidazole)), LiF/Al로 구성되어 있는 CTOLED의 구조를 보여준다. 발광층 사이의 DPEPO는 선택적 CBL과 EBL로 역할을 하면서 색 변화를 결정한다. ITO와 HTL에서 주입된 정공은 쉽게 적색광이 방출되는 발광층으로 이동하지만 전자들은 장벽에 막혀 이동하기가 쉽지 않기 때문에, 5~7 V의 낮은 전압에서는 적색광이 방출되는 층에서의 삼중항 상태의 엑시톤의 재결합으로 인해 적색광이 방출된다. 11~13 V의 높은 전압에서는 전자가 장벽을 넘을 충분한 에너지를 얻어서 청색광을 방출하는 층에서 재결합하기에 충분한 양의 엑시톤이 발생하기 때문에 선명한 청색광이 방출된다. 따라서 Fig. 7(e)에서 볼 수 있듯이 5 V에서는 어두운 붉은색, 6~7 V에서는 옅은 붉은색, 8~10 V에서는 흰색, 그리고 11~12 V에서는 하늘색, 마지막으로 13 V에서 어두운 푸른색의 색변화를 보인다. 그래서 정상적인 ECG 신호는 붉은색에서 흰색의 색

변화를 보여주며 비정상적인 신호는 흰색에서 푸른색을 나타낸다. 전압에 따라 색이 변화하는 기기를 이용해 심박수를 실시간으로 시각화가 가능하기 때문에, 이러한 심박 측정 디스플레이는 미래의 웨어러블 생체 의학 관찰 기기로 사용이 가능하다.

4. 결론 및 전망

앞서 보고된 바와 같이 자극을 감지하는 동시에 빛을 방출하는 사용자와 상호작용을 하는 다양한 자극 감지 디스플레이들이 있다. 본 총설에서는 여러 종류의 자극 중 압력, 빛, 습도, 전도도, 자성, 액체에 반응하는 디스플레이의 구동원리에 대해 자세히 고찰하였다. 압력 센서에서는 전극 사이 공간 높이의 변화로 인한 임피던스의 변화를 이용해 압력을 감지하였고, 빛 센서에서는 나노로드 형태의 QD를 이용해 빛을 감지하는 동시에 빛을 방출할 수 있었다. 습도 센서에서는 자가 복제가 가능한 박테리오파지와 HLRP를 이용했고 자극의 민감도에 따라 패턴을 분류해 민감한 부분은 습도가 높아지면 색이 크게 변화하는 방식을 활용했다. 전도도 반응 센서에서는 기존의 구조와는 다르게 한 평면상의 두 전극을 사용해 기기 위의 반응물질에 내재되어 있는 전도도를 이용하여 물질을 감지하였다. 자성 센서는 전도도 센서와 비슷하게 한 평면 상의 두 개의 전극을 이용해서 떠 있는 물질의 자성으로 발생하는 자기장에 의해 입자가 배열되어 전류가 흐르는 것을 이용하여 자성을 감지할 수 있었다. 이 기기에서는 이러한 특징을 이용해 자성을 가진 펜이나 막대기를 이용해 정보를 기록하는 보드 형태로의 활용을 보여주었다. 마지막으로 액체 센서에서는 직접 용량식 결합과 액체의 종류마다 임피던스가 다르다는 점을 활용하여 의료용 액체의 감지를 가능하게 했다. 이렇게 단일 방향이 아닌 양방향의 상호작용을 하는 센서와 디스플레이의 결합은 지문 인식과 심박수 측정, 체온 측정 등 다양한 분야에서 사용될 수 있고, 박막 형태로



제작되기 때문에 기기를 사용할 때의 불편 또한 개선된다는 장점이 있다.

본 글에서 소개한 방식 이외에도 다양한 종류의 센서를 이용하여 사용자 상호작용적 디스플레이를 구현하기 위한 다양한 시도들이 계속되고 있다. 가스 센서가 탑재된 웨어러블 디바이스를 착용하면 가스 누출과 같은 사고에 즉각적으로 반응할 수 있다. 그리고 뇌파 센서가 융합된 디스플레이는 사람들의 감정 상태를 쉽게 알게 해준다. 이렇게 많은 종류의 센서를 디스플레이에 통합한다면 소자 구조가 간단해지고 전체적인 기기 크기가 줄어들어 가벼워질 것이다[19-24]. 사람들과 기기의 양방향의 소통을 가능하게 하는 센서와 디스플레이가 결합된 새로운 형태의 디스플레이는 정확도를 높이면서도 외부의 회로와의 연결 없이 사용할 수 있게 되면서 기기를 이용하는 데 편리해질 것이다. 그리고 발전된 자극 감응형 디스플레이들은 새로운 형태의 웨어러블 디스플레이의 시장을 개척하여 차세대 디스플레이 시장을 개척할 것이다.

기호설명

- FET: Field-effect transistors
- OLED: Organic light emitting diode
- QD: Quantum dot
- EL: Electroluminescence
- ITO: Indium tin oxide
- ACEL: Alternating current electroluminescence
- MWNTs: Multi-walled carbon nanotubes
- SPL: Sound pressure level
- NS: Normal saline

- TPN: Total parenteral nutrition
- CNT: Carbon nanotubes
- EBL: Exciton-blocking layer
- CBL: Charge blocking layer
- EBL: Electron blocking layer

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

YWK, MKC were involved in analysis, discussion, and drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (grant no. 2021R1C1C1007997). This work was also supported by the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, the Ministry of Food and Drug Safety) (Project Number: 9991007287, KMDF_PR_20200901_0114-2021-03). This work was supported by the 2023 research Fund (1.230026.01) of UNIST.

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.



AUTHORS



김예원
2023년: 울산과학기술원 신소재공학과
학사
2023년~현재: 울산과학기술원 반도체
소재·부품대학원 석박통합과정



최문기
2009년: 서울대학교 화학생물공학부 학
사
2016년: 서울대학교 화학생물공학부 석
박사
2016년~2017년: 서울대학교 화학생물
공학부, IBS 나노입자연구센터 선임

연구원

2017년~2019년: UC Berkeley 박사후연구원
2019년~현재: 울산과학기술원 신소재공학과 조교수

REFERENCES

- [1] Choi, M. K.; Yang, J.; Kang, K.; Kim, D. C.; Choi, C.; Park, C.; Kim, S. J.; Chae, S. I.; Kim, T. H.; Kim, J. H.; Hyeon, T.; Kim, D. H. Wearable Red-Green-Blue Quantum Dot Light-Emitting Diode Array Using High-Resolution Intaglio Transfer Printing. *Nat. Commun.* 2015, 6, 7149.
- [2] Song, J. K.; Son, D.; Kim, J.; Yoo, Y. J.; Lee, G. J.; Wang, L.; Choi, M. K.; Yang, J.; Lee, M.; Do, K.; Koo, J. H.; Lu, N.; Kim, J. H.; Hyeon, T.; Song, Y. M.; Kim, D. H. Wearable Force Touch Sensor Array Using a Flexible and Transparent Electrode. *Adv. Funct. Mater.* 2017, 27, 1605286.
- [3] Baek, S.; Ban, H. W.; Jeong, S.; Heo, S. H.; Gu, D. H.; Choi, W.; Choo, S.; Park, Y. E.; Yoo, J.; Choi, M. K.; Son, J. S. Generalised Optical Printing of Photocurable Metal Chalcogenides. *Nat. Commun.* 2022, 13, 5262.
- [4] Heo, S. H.; Yoo, J.; Lee, H.; Jang, H.; Jo, S.; Cho, J.; Baek, S.; Yang, S. E.; Gu, D. H.; Mun, H. J.; Oh, M. W.; Shin, H.; Choi, M. K.; Shin, T. J. & Son, J. S. Solution-Processed Hole-Doped SnSe Thermoelectric Thin-Film Devices for Low-Temperature Power Generation. *ACS Energy Lett.* 2022, 7, 6, 2092-2101.
- [5] Kwon, J. I.; Park, G.; Lee, G. H.; Jang, J. H.; Sung, N. J.; Kim, S. Y.; Yoo, J.; Lee, K.; Ma, H.; Karl, M.; Shin, T. J.; Song, M. H.; Yang, J.; Choi, M. K. Ultrahigh-Resolution Full-Color Perovskite Nanocrystal Patterning for Ultrathin Skin-Attachable Displays. *Sci. Adv.* 2022, 8, 43, eadd0697.
- [6] Park, C.; Kim, M. S.; Kim, H. H.; Sunwoo, S. H.; Jung, D. J.; Choi, M. K.; Kim, D. H. Stretchable Conductive Nanocomposites and Their Applications in Wearable Devices. *Appl. Phys. Rev.* 2022, 9, 021312.
- [7] Yang, J.; Choi, M. K.; Yang, U. J.; Kim, S. Y.; Kim, Y. S.; Kim, J. H.; Kim, D. H.; Hyeon, T. Toward Full-Color Electroluminescent Quantum Dot Displays. *Nano Lett.* 2021, 21, 1, 26-33.
- [8] Jo, S.; Cho, S.; Yang, U. J.; Hwang, G. S.; Baek, S.; Kim, S. H.; Heo, S. H.; Kim, J. Y.; Choi, M. K.; Son, J. S. Solution-Processed Stretchable Ag₂S Semiconductor Thin Films for Wearable Self-Powered Nonvolatile Memory. *Adv. Mater.* 2021, 33, 2100066.
- [9] Jang, J.; Oh, B.; Jo, S.; Park, S.; An, H. S.; Lee, S.; Cheong, W. H.; Yoo, S.; Park, J. U. Human-



- Interactive, Active-Matrix Displays for Visualization of Tactile Pressures. *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1900082.
- [10] Jin, W.; Kim, E. H.; Lee, S.; Yu, S.; Han, H.; Kim, G.; Lee, S. W.; Jang, J.; Lee, C. E.; Shim, W.; Park, C. Tandem Interactive Sensing Display De-Convoluting Dynamic Pressure and Temperature. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31, 2010492.
- [11] Oh, N.; Kim, B. H.; Cho, S. Y.; Nam, S.; Rogers, S. P.; Jiang, Y.; Flanagan, J. C.; Zhai, Y.; Kim, J. H.; Lee, J.; Yu, Y.; Cho, Y. K.; Hur, G.; Zhang, J.; Trefonas, P.; Rogers, J. A.; Shim, M. Double-Heterojunction Nanorod Light-Responsive LEDs for Display Applications. *Science*. 2017, 355, 6325, 616-619.
- [12] Yoo, Y. J.; Kim, W. G.; Ko, J. H.; Kim, Y. J.; Lee, Y.; Stanciu, S. G.; Lee, J. M.; Kim, S.; Oh, J. W.; Song, Y. M. Large-Area Virus Coated Ultrathin Colorimetric Sensors with a Highly Lossy Resonant Promoter for Enhanced Chromaticity. *Adv. Sci.* 2020, 7, 2000978.
- [13] Kim, E. H.; Cho, S. H.; Lee, J. H.; Jeong, B.; Kim, R. H.; Yu, S.; Lee, T. W.; Shim, W.; Park, C. Organic Light Emitting Board for Dynamic Interactive Display. *Nat. Commun.* 2017, 8, 14964.
- [14] Lee, S. W.; Baek, S.; Park, S. W.; Koo, M.; Kim, E. H.; Lee, S.; Jin, W.; Kang, H.; Park, C.; Kim, G.; Shin, H.; Shim, W.; Yang, S.; Ahn, J. H.; Park, C. 3D Motion Tracking Display Enabled by Magneto-Interactive Electroluminescence. *Nat. Commun.* 2020, 11, 6072.
- [15] Jang, J.; Lee, S. W.; Lee, S.; Lee, C. E.; Kim, E. H.; Jin, W.; Lee, S.; Kim, Y.; Oh, J. W.; Jung, Y.; Kim, H. Y.; Yong, H.; Park, J.; Lee, S.; Park, C. Wireless Stand-Alone Trimodal Interactive Display Enabled by Direct Capacitive Coupling. *Adv. Mater.* 2022, 34, 2204760.
- [16] An, B. W.; Heo, S.; Ji, S.; Bien, F.; Park, J. U. Transparent and Flexible Fingerprint Sensor Array with Multiplexed Detection of Tactile Pressure and Skin Temperature. *Nat. Commun.* 2018, 9, 2458.
- [17] Kim, J.; Shim, H. J.; Yang, J.; Choi, M. K.; Kim, D. C.; Kim, J.; Hyeon, T.; Kim, D. H. Ultrathin Quantum Dot Display Integrated with Wearable Electronics. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1700217.
- [18] Koo, J. H.; Jeong, S.; Shim, H. J.; Son, D.; Kim, J.; Kim, D. C.; Choi, S.; Hong, J. I.; Kim, D. H. Wearable Electrocardiogram Monitor Using Carbon Nanotube Electronics and Color-Tunable Organic Light-Emitting Diodes. *ACS Nano*. 2017, 11 (10), 10032-10041.
- [19] Cheon, H. J.; An, T. K.; Kim, Y. H. Diketopyrrolopyrrole (DPP)-Based Polymers and Their Organic Field-Effect Transistor Applications: A Review. *Macromol. Res.* 2022, 30, 71-84.
- [20] Sozmen, F.; Kucukoflaz, M.; Ergul, M.; Inan, Z. D. S.; Bozkurt, Y.; Taydas, D. Synthesis of Multifunctional Organic Nanoparticles Combining Photodynamic Therapy and Chemotherapeutic Drug Release. *Macromol. Res.* 2022, 30, 61-69.
- [21] Yu, C.; Song, Y. S. Modification of Graphene Aerogel Embedded Form-Stable Phase Change Materials for High Energy Harvesting Efficiency. *Macromol. Res.* 2022, 30, 198-204.
- [22] García-Verdugo, K. F.; Ramírez-Irigoyen, A. J.; Castillo-Ortega, M.; Rodríguez-Félix, D. E.;



Quiroz-Castillo, J. M.; Tánori-Córdova, J.; Rodríguez-Félix, F.; Ledezma-Pérez, A.; Castillo-Castro, T. d. A pH/Temperature-Sensitive s-IPN Based on Poly (vinyl alcohol), Poly(vinyl methyl ether-alt-maleic acid) and Poly(vinyl methyl ether) Prepared by Autoclaving. *Macromol. Res.* 2022, 30, 353-364.

[23] Kim, I. B.; Kim, Y. J.; Ki, D. Y.; Jang, S. Y. A

Thiophene Based Dopant-Free Hole-Transport Polymer for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Macromol. Res.* 2022, 30, 391- 396.

[24] Yang, J.; Yoo, J.; Yu, W. S.; Choi, M. K. Polymer-Assisted High-Resolution Printing Techniques for Colloidal Quantum Dots. *Macromol. Res.* 2021, 29, 391-401.