

변형에 둔감한 본질적으로 신축성 있는 트랜지스터

본질적으로 신축성 있는 전자 장치는 인체와 친밀한 인터페이스를 형성하여 신체의 움직임을 제한하지 않고 생리적 신호를 모니터링하는 데 활용할 수 있는 전자 장치의 가능성을 제시한다. 그러나 일반적으로 기계적 변형은 내부 저항을 증가시키거나 전자 신호의 노이즈를 증가시켜 전자 소자의 전기적 특성을 저하시키는 단점이 있다. Hooke의 법칙과 직렬 및 병렬 스프링 모델에 기초하여, 신장된 기관의 변형 분포는 국부적 영역의 강성에 의해 영향을 받는다. 따라서 신축성 있는 전자장치에서 활성 영역(active area)이 경험하는 변형을 줄이기 위하여 일반적으로 신축성 있는 인터커넥트(전자 장치에 대한 변형률이 1% 미만)로 연결된 단단한 재료를 기관으로 활용한다. 그러나 단단한 재료는 본질적으로 신축성이 없기 때문에 신축성 있는 기관과의 인터페이스에서 큰 모듈러스(modulus) 불일치로 인한 상당한 변형 집중을 유발하고 이는 반복 변형시 전자소자의 특성 저하를 야기한다.

본 연구에서는 조정 가능한 강성을 가진 패턴화된 탄성 중합체(elastomer) 층을 트랜지스터 구조에 활용하여 전체 탄성중합체 엔지니어링 접근 방식을 사용하였다. 이를 통해 변형에 둔감한 본질적으로 신축성 있는 트랜지스터 어레이를 제작할 수 있음을 보였다. 탄성중합체의 가교 밀도를 변화시킴으로써 전자소자의 활성 영역 부분에 국부적으로 강성 영역을 형성하여 외부 변형 하에 이 부분의 변형성을 선택적으로 감소시켰다. 이러한 접근 방식을 통해 340개 cm^2 의 소자 밀도를 갖는 트랜지스터 어레이를 100% 변형률로 늘렸을 때, 5% 미만의 성능 변화를 보이는 낮은 변형률 민감도를 갖는 전자소자 어레이를 형성했다. 또한 전기 생리학적인 신호의 안정적인 모니터링을 위해 탄성중합체 엔지니어링을 NOR 게이트, 링 발진기 및 고이득 증폭기를 포함한 변형에 둔감한 회로 요소를 제조하는 데 활용할 수 있음을 선보였다.

본 연구결과는 “Strain-insensitive intrinsically stretchable transistors and circuits”의 제목으로 2021년 *Nature Electronics*에 게재되었다.

<W. Wang et al., *Nat. Electron.*, **4**, 143-150 (2021), DOI: 10.1038/s41928-020-00525-1>

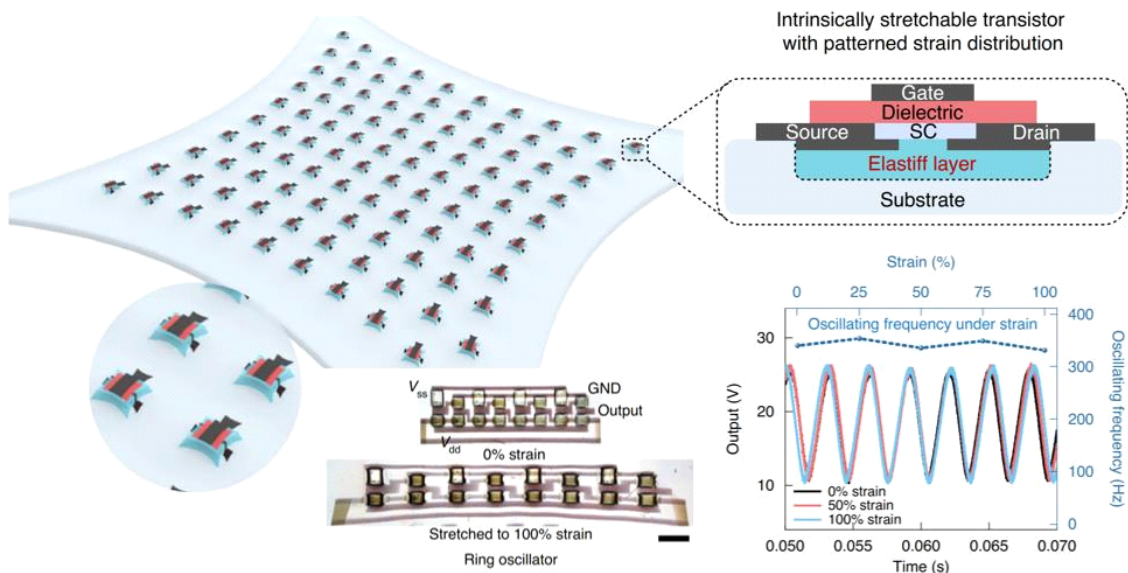


그림 1. 변형에 둔감한 본질적으로 신축성 있는 트랜지스터 및 회로.

신축성있는 유기 광전소자 기반의 실시간 건강 모니터링 패치

지속적인 건강 모니터링에 대한 관심 증가와 코로나19 상황 가운데 공중 보건 위협에 대한 우려로 인해 일상 건강 관리 플랫폼에 대한 대중의 관심이 점차 증대되고 있다. 이에 따라 최근 수년 간 심박수, 혈중 산소 등을 모니터링하는 스마트 워치 및 피트니스 트래커에 대한 수요가 급증하고 있다. 그러나 단단한 기판 위에 제작된 시판되고 있는 스마트 워치류의 웨어러블 전자소자들은 일상활동 중 피부와 밀접 접촉하기 어렵기 때문에 정확한 생리학적 정보를 제공하는데 한계가 있다. 따라서 최근 학계에서 기계적으로 신축성있는 소재들을 이용하여 피부에 밀접하게 접촉하여 생체의 전기 생리학적 신호를 비침습적으로 감지하는 전자피부 센서를 개발하고자 하는 노력들이 활발히 진행되고 있다. 전자소자에 신축성을 부여하기 위해 사전 변형된 버클링(buckling) 박막 또는 구불구불한(serpentine) 금속 배선구조 등을 이용하여 기계적으로 안정한 소자를 제작하고자 많은 연구가 진행되어 왔다.

그러나, 사전변형된 버클링 구조의 경우 픽셀 중첩을 야기하고, 구불구불한 배선구조는 소자의 밀도를 저하하여 고밀도 광전 픽셀 어레이 제작에 적합하지 않다.

본 연구에서는 신축성있는 유기발광다이오드(OLED)와 유기 PPG센서를 집적한 헬스케어 패치를 개발하고 이를 이용하여 실시간으로 심박을 측정하고 시각화하는 장치를 개발하였다. 신축성있는 광전소자는 총 두께 15 마이크로미터의 탄성중합체 기판 위에 응력 완화층과 신축성있는 미세균열 Au 배선으로 제작되었다. 미세균열 Au 배선은 Au를 $0.1 \text{ \AA/s}$ 로 증착할 때 50%와 100% 장력하에 R/R0 값을 3.43, 9.03의 수치를 보이며 30% 인장을 1200번 반복 수행 시에도 안정적인 저항값을 나타내었으며 이를 기반으로 한 헬스케어 패치를 피부에 밀착시 30%의 외부 응력하에도 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다.

본 연구결과는 “Standalone real-time health monitoring patch based on a stretchable organic optoelectronic system”의 제목으로 2021년 *Science Advances*에 게재되었다.

〈Y. Lee et al., *Sci. Adv.*, **7**, eabg9180 (2021), DOI: 10.1126/sciadv.abg9180〉

방열특성을 갖는 신축성 유기발광다이오드

신축성 있는 유기발광다이오드는 차세대 디스플레이 기술로써 빠르게 발전하는 웨어러블 디스플레이 분야의 핵심 소자로 각광받고 있다. 그러나 현재 기술로는 변형 시 낮은 효율과 기계적 안정성을 보이며 구부리거나 늘릴 때 변형에

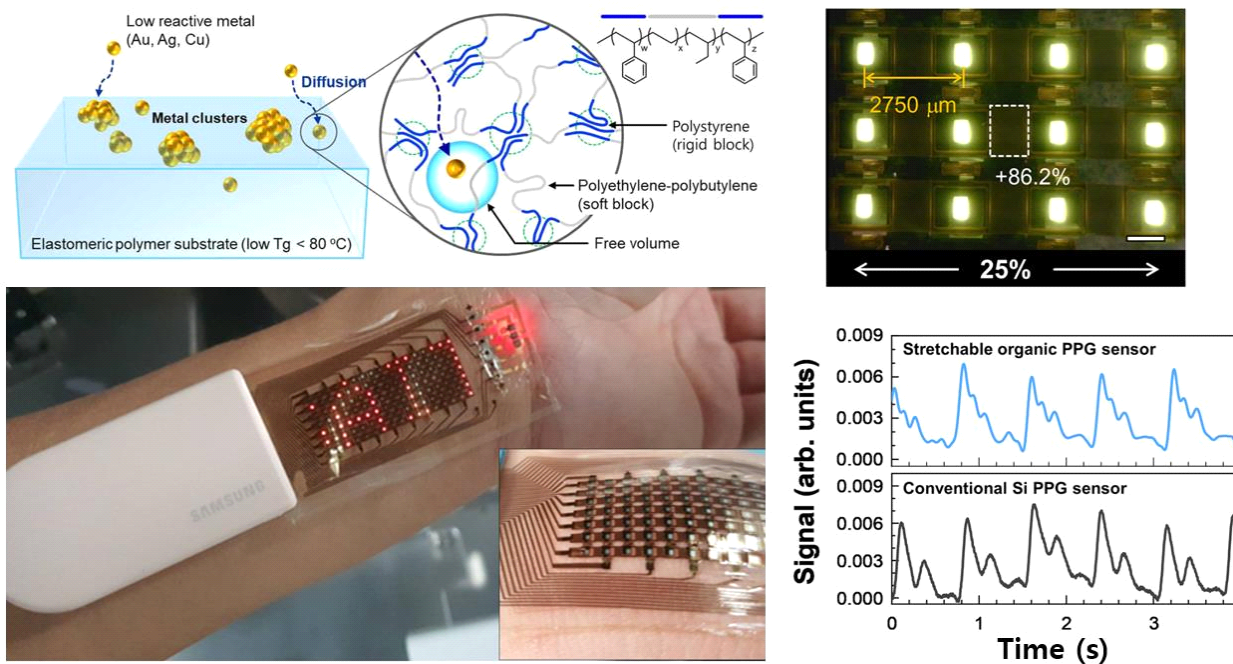


그림 2. 신축성있는 유기 광전소자 기반의 실시간 건강 모니터링 패치. 미세 크랙이 간 Au배선 형성의 매커니즘 및 신축성있는 OLED 어레이와 이를 이용한 헬스케어 패치. 신축성 있는 유기 PPG 센서는 Si 기반 PPG 센서와 유사한 신호특성을 보인다.

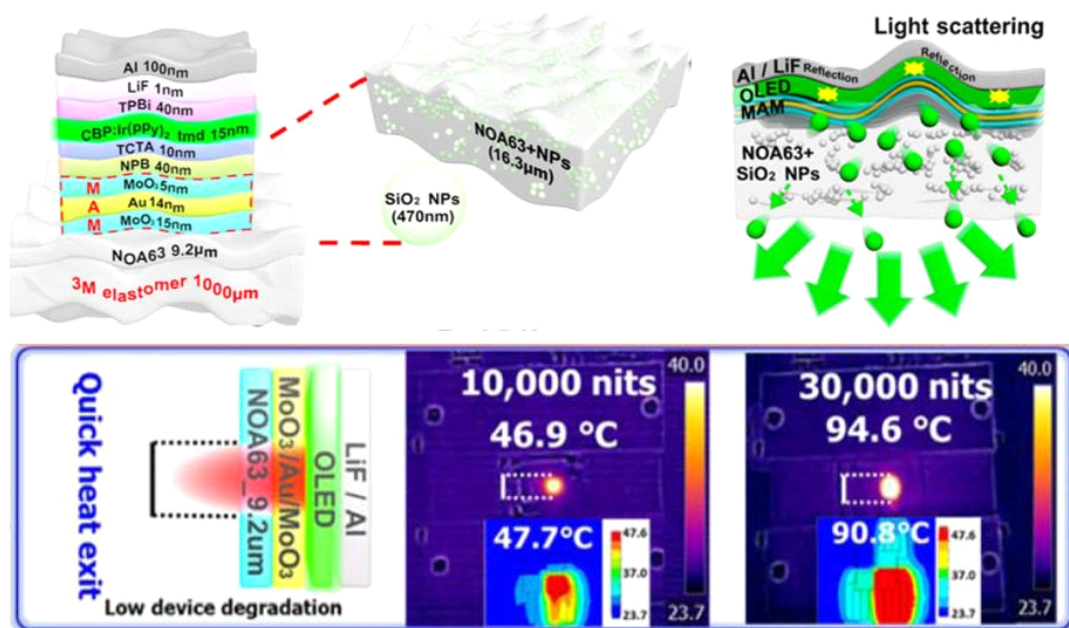


그림 3. 구조적으로 신축성있는 유기발광다이오드의 단면구조 및 실리카 나노입자가 함유된 NOA63 박막의 빛 추출 모식도. NOA63 박막의 열 발산 경향에 따른 개략도 및 적외선 카메라 이미지와 열 시뮬레이션.

의해서 색좌표가 바뀌거나 밝기가 바뀌는 등의 제약이 존재한다. 전통적으로 많이 사용되는 ITO 혹은 금속 그리드 투명전극을 대신하여 실버나노와이어 복합체, 그래핀 투명전극 등이 활발히 연구되었으나 소자의 안정성 및 효율에 제약이 있다.

본 연구에서는 $\text{MoO}_3/\text{Au}/\text{MoO}_3$ 로 구성된 투명전극과 초박막 NOA63과 3M 탄성중합체로 이뤄진 봉지구조를 활용하여 추가적인 전도성 박막 없이 방열특성을 보이는 유기발광다이오드를 개발하였다. MoO_3 , Au의 높은 일함수는 정공의 주입을 원활하게 하며 금의 높은 연성은 인장특성을 향상시킨다. 최적화된 $\text{MoO}_3/\text{Au}/\text{MoO}_3$ 구조는 높은 투명도 (70~80%)와 낮은 면저항 (~20 Ω/sq)을 보인다. 또한 초박막 NOA63 박막을 기관삼아 제작된 유기발광다이오드는 대략 1.4 MPa의 낮은 Young's modulus를 갖는 미리 2차원적으로 늘려진 3M 탄성중합체 위에 전사되며, 초기 압력이 해소된 이후 생성된 2차원 버클링 구조는 발광소자의 기계적 손상을

막아준다. 이를 통해 최대 100% 변형에도 효율저하 (efficiency roll-off) 없이 약 20%의 높은 외부양자효율 (external quantum efficiency)과 색안정성을 갖는 신축성 유기발광전자소자를 개발하였다. 또한 NOA63 박막에 제한된 빛의 추출을 가능케 하는 470 nm 크기의 실리카 나노입자를 섞어 아웃커플링 효율을 약 10% 향상시켰다.

본 연구결과는 “Highly efficient, heat dissipating stretchable organic light-emitting diodes based on a $\text{MoO}_3/\text{Au}/\text{MoO}_3$ electrode with encapsulation”의 제목으로 2021년 *Nature Communications*에 게재되었다.

<D. K. Choi *et al.*, *Nat. Commun.*, **12**, 2864 (2021), DOI: 10.1038/s41467-021-23203-y>

<최문기, email: mkchoi@unist.ac.kr>