

# 신축성 트랜지스터 기술 동향 (Trends in Stretchable Transistor Technology)

오 힘 찬 (한국전자통신연구원 선임연구원)

## 1. 서론

구부리거나 접을 수 있는 플렉서블 전자소자 (Flexible Electronic Devices)는 이미 우리에게 친숙한 개념이 되었다. 화면을 접을 수 있는 폴더블 스마트폰을 주변에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 이러한 폴더블 제품에서 직접적으로 접히는 부품은 플렉서블 디스플레이로, 발광부인 유기발광다이오드 (OLED, Organic Light Emitting Diode)와 이를 제어하는 박막 트랜지스터 (TFT, Thin Film Transistor)가 실질적인 변형을 겪게 된다. 여기서 트랜지스터는 발광소자를 켜고 꺼고 전류를 공급하는 스위칭/드라이빙 소자로, 디스플레이 구동에 있어 핵심 요소라고 할 수 있다.

이러한 플렉서블 트랜지스터는 앞서 언급했듯이 디스플레이 제품에 주로 사용되고 있지만, 논리 회로를 구성하여 여러 입력으로 부터 들어오는 신호를 처리하고 계산할 수 있는 정보처리장치로 그 영역을 확장해 나갈 것으로 예상하고 있다. 특히 웨어러블 (Wearable) 전자소자를 구성함에 있어, 유연한 모재에 형성할 수 있어 가벼우면서도 신체의 움직임에 의해

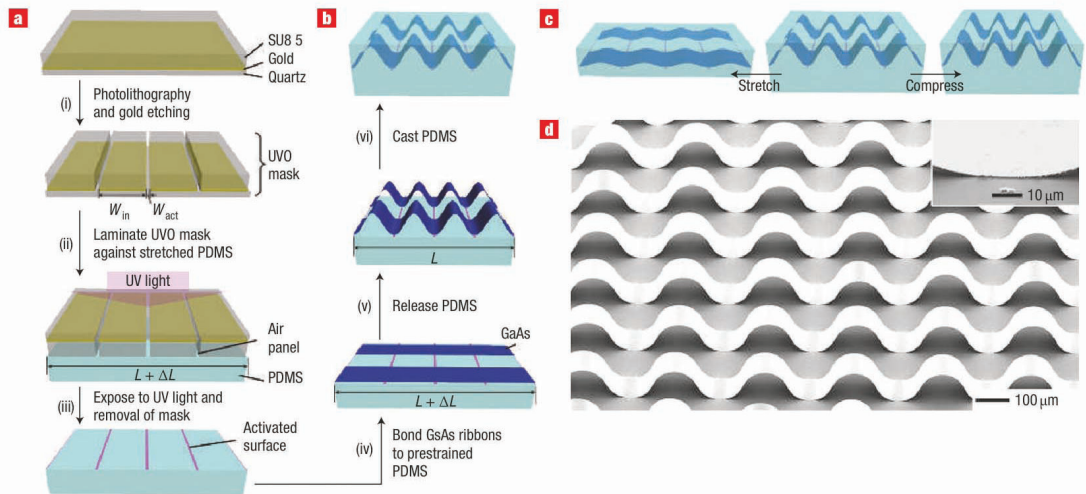
변형되어도 전기적 특성이 흔들리지 않는 트랜지스터가 꼭 필요하다.

구부러지거나 접히는 단계인 플렉서블 전자소자로 웨어러블 제품을 구성할 경우 제품 자체의 면적 내지는 길이가 거의 늘어나지 않으므로 착용했을 때 부자연스러운 느낌을 주며, 신체에 밀착되는 능력이 부족하므로 센싱에 적합하지 않을 수 있다. 이런 문제를 극복할 수 있는 것이 바로 플렉서블 다음 세대의 전자소자인 신축성 (Stretchable) 전자소자 기술이다. 10% 이상의 큰 변형율에서도 신축성 전자소자는 파괴되지 않으며 그 성능을 유지할 수 있다. 본고에서는 이런 신축성 트랜지스터 기술에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 주름 구조를 이용한 신축성 트랜지스터 기술

신축성 전자소자 기술이 활발히 연구되기 이전에, 플렉서블 전자소자 기술 발달의 노력으로 구부리거나 접힌 상태에서도 안정적인 소자를 얻을 수 있는 기반이 마련되었다. 이를 바탕으로 유연 기판 전체를 주름 지도록 만들고 이



〈그림 1. 주름 구조를 갖는 신축성 반도체 소재〉 [1]

주름이 펼쳐지면서 제품 전체가 늘어나는 신축성 전자소자가 연구 초기에 주로 발표되었다.

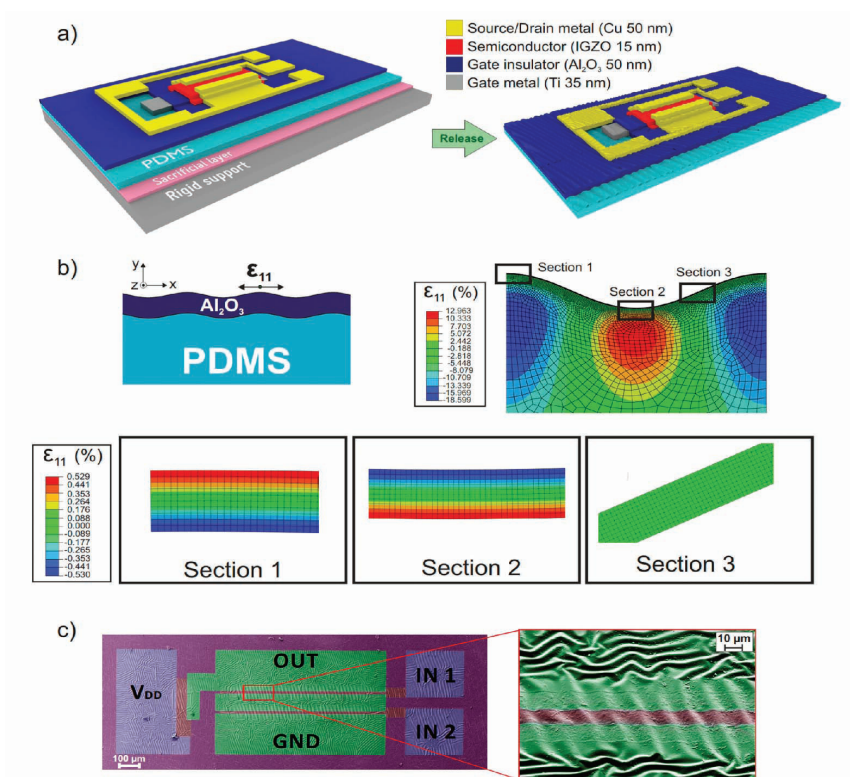
주름 구조를 만드는 데 있어서 사전 신장 후 풀기, 압축법, 몰딩, 용매 팽창, 열팽창, 3D 프린팅의 방법이 쓰일 수 있다. 이 중에서 사전 신장 후 놓는 방법이 신축성 트랜지스터를 만드는데 가장 많이 사용되어 왔다. 유연한 개별 소재나 전체 박막 전자소자가 단단한 기판위에 제작이 되면 이를 미리 잡아 당겨 놓은 엘라스토머로 전사한다. 당김힘을 풀게 되면 엘라스토머가 다시 수축이 되고 그 위에 전사되어 있던 유연 박막 전자소자는 구불구불하게 주름진 구조를 갖게 된다.

그림 1. 은 초기 주름 구조 신축성 반도체 소재의 예로, 스트링 형태의 GaAs 화합물 반도체 소자를 단단한 기판에서 떼어낸 뒤에 엘라스토머인 PDMS로 전사하는 형태이다. 이 때 PDMS의 일부분만을 자외선 처리하여 반도체

와의 접착력을 늘려, 사전 신장된 PDMS가 다시 스트레인 릴리즈 될 때 접착력이 강화된 부분만 반도체와 PDMS가 붙어 있고 나머지 부분은 떨어지면서 파도 모양의 구조를 형성하게 되는 것이다.

이런 부분 소재 외에 전체 소자가 유연기판에 형성된 이후에 비슷한 방식으로 엘라스토머에 전사되는 방법도 많이 발표되었다. 이 경우 주로 박막 반도체 소재인 저온 다결정 실리콘, IGZO와 같은 산화물 반도체, CNT가 주로 적용되었다.

주름 구조의 장점은 기존의 유연 전자 소자의 공정을 거의 그대로 사용할 수 있어 비교적 용이하게 구현할 수 있다는 점이다. 따라서 신축성 전자소자 연구 초기에 많이 발표되었다. 다만 주름 형태가 보통 무작위로 배열되기 때문에 주름의 깊이나 주기, 균일도를 제어하기가 쉽지 않은 한계가 있다. 또한 주름져 있기 때문



〈그림 2. 주름 구조를 갖는 신축성 박막 트랜지스터〉 [2]

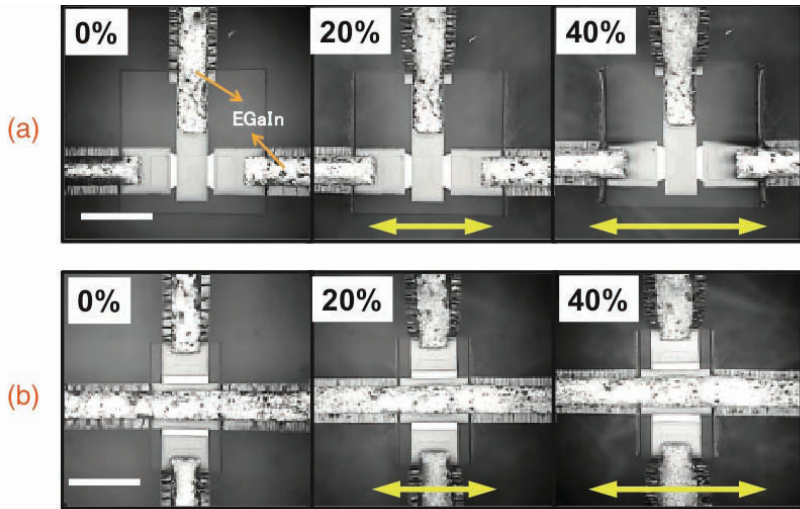
에 신체 표면에 밀착되지 않는 부분이 많아 센싱이 어려울 수 있으며 디스플레이로 활용한다고 했을 때 빛의 산란이 문제가 될 수 있다.

## 2.2 국소 경도 조절을 통한 신축성 트랜지스터 기술

전자소자는 기능 소자류인 발광 다이오드, 센싱 파트 등이 트랜지스터들로 이루어진 회로에 의해 제어되고 이들은 서로 배선을 통해 연결된다. 이 때 기능 소자류가 존재하는 곳 기판의 경도를 국소적으로 높여 변형이 최소화 되도록 하고 변형에 비교적 강한 배선이 변형율을 담

당하게 할 수 있다. 이 방법은 주름 구조와 다르게 변형이 집중되는 곳을 제작자가 제어할 수 있는 장점이 있다. 또한 트랜지스터가 받는 스트레스가 거의 없기 때문에 신축 안정성 또한 우수하다.

그림 3이 이러한 방법으로 구현한 대표적인 신축성 트랜지스터 어레이의 모습이다. 단단한 폴리이미드 사각 부분위에 박막 트랜지스터가 올라가 있어 이부분은 40%까지 늘려도 트랜지스터가 받는 변형율은 거의 없다. 반면에 액체 금속으로 형성된 세 개의 배선 부분이 늘어나게 되는데 액상 형태이어서 변형에 매우 강



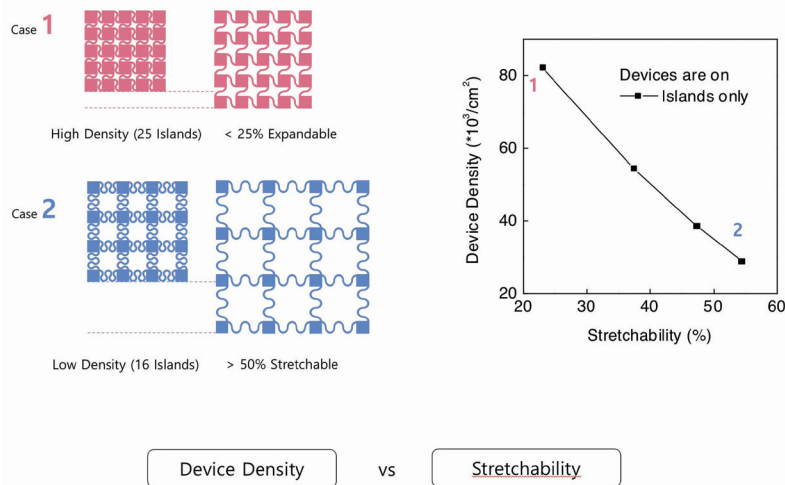
〈그림 3. 단단한 트랜지스터 부분과 이를 연결하고 있는 신축성 액체 금속 배선〉 [3]

력하므로 전체 어레이의 신축 안정성이 보장될 수 있다.

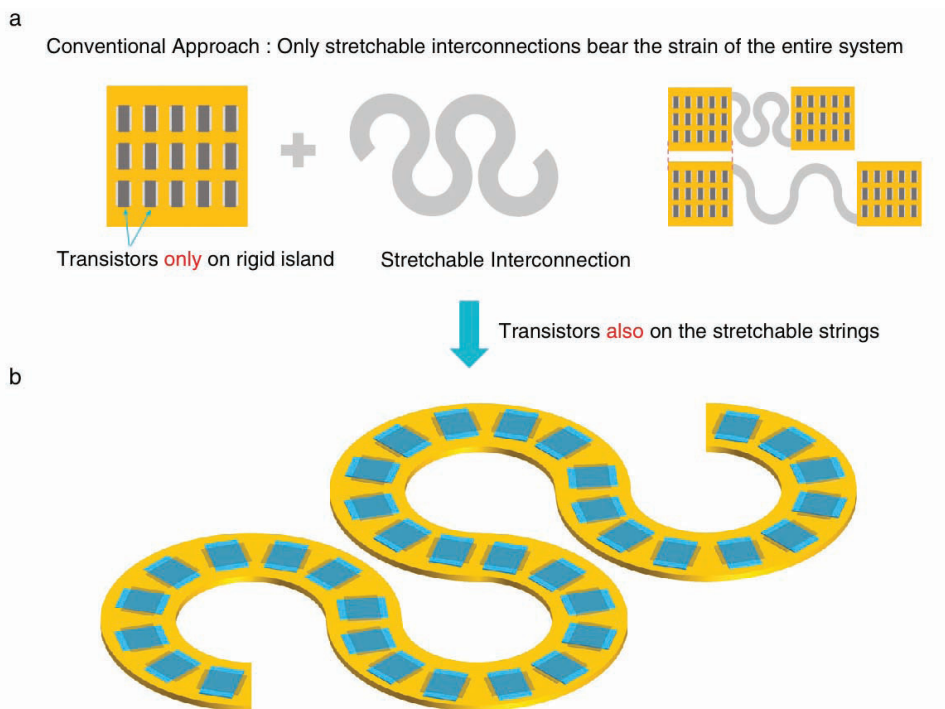
다만 이 방법의 결정적인 단점은 신축 배선이 전체 제품의 변형율을 모두 감당해야 한다는 것이다. 그림 4의 케이스1과 같이 트랜지스터가 차지하는 면적 즉, 단단한 부위가 많아질 수

록 전체 제품의 신축 능력은 떨어질 수 밖에 없다. 한편 동일 제품 크기에서 케이스2와 같이 트랜지스터 수를 줄이면 신축 능력은 올라가지만 케이스1에 비해서 더 단순한 동작이나 더 낮은 해상도만을 얻어 낼 수 있다.

이를 어느 정도 완화하는 방법은 그림 5에 나



〈그림 4. 국소 경도 조절법에서 소자 밀도와 신축 능력의 관계〉



〈그림 5. 신축성 배선 부분에도 트랜지스터를 집적하여 소자 밀도를 향상시키는 방법〉 [4]

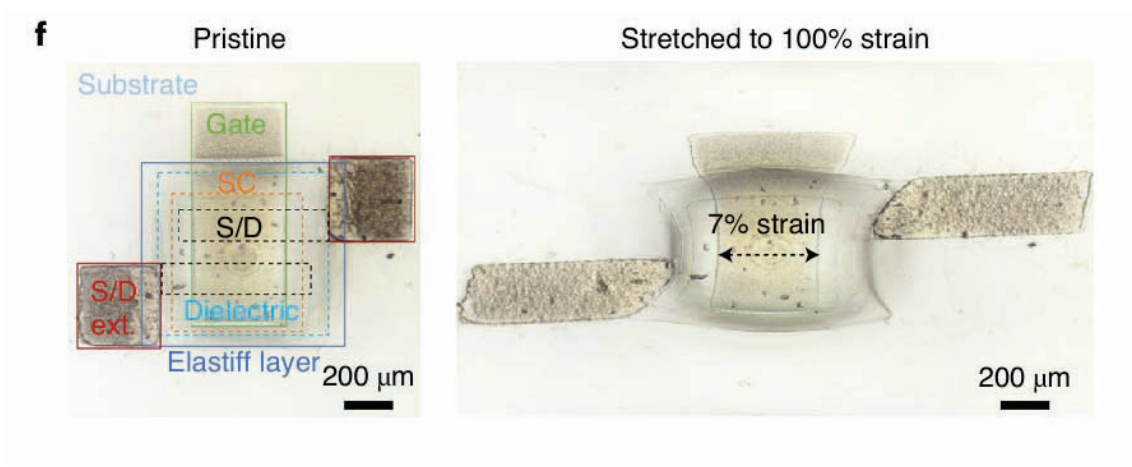
타낸 바와 같이 신축성 배선 부분에도 트랜지스터를 집적시키는 것이다. 이 때는 트랜지스터도 변형을 겪게 되는데 이로 인한 파괴를 막기 위해서 보호층이 적용될 수 있다. 다만 이 방법도 제품 전체 면적을 활용하는 것이 아니기 때문에 소폭의 소자 밀도 향상을 기대할 수 밖에 없다.

### 2.3 본질적으로 신축성 있는 트랜지스터 기술

사실 앞의 두 방법은 소자 자체가 늘어나지 않으며 기판 내지는 지지소재의 구조 변형을 통해 신축성을 매우 간접적으로 부여하는 방식이다. 그러나 최근에는 트랜지스터를 구성하는 모든 부분, 즉 배선, 절연막, 반도체까지 일정량 늘어날 수 있는 기술이 많이 발표되고 있다.(그

림6) 이 방법에 있어서는 무기물 소재보다는 변형에 더 자유로운 유기물 소재가 각광 받고 있다.

이 방법은 제품 전체의 면적을 활용할 수 있으므로 앞의 두 방법에 비해 소자 밀도를 높일 수 있다. 다만 고이동도 유기물 반도체의 경우 결정성이 대개 높다. 이럴 경우 변형에 좀 더 취약할 수 있는데 왜냐하면 무질서하고 느슨하게 쌓인 재료가 기계적 변형에 더 유리할 것이기 때문이다. 즉 성능과 신축능력이 트레이드 오프 관계에 있다고 할 수 있다. 이러한 저성능 약점을 극복해 나간다면 유기물 재료가 신축성 전자소자 분야를 선도할 것으로 기대한다.



〈그림 6. 본질적으로 신축성이 있는 트랜지스터 기술〉 [5]

### 3. 결론

우리나라는 디스플레이/반도체 강국이지만 그 위치를 중국, 대만 등에 위협받고 있는 실정이다. 현재까지 OLED 및 폴더블 제품으로 기술 우위를 점하고 있지만 앞으로도 그 지위를 확고히 하기 위해서 신축성 전자소자와 같은 다음 세대 기술 개발이 반드시 필요하다. 많은 인력, 자원 지원이 절실해 지는 시점이다.

### 4. 참고문헌

- [1] Sun, Y., Choi, W., Jiang, H. et al. Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics. *Nature Nanotech* 1, 201 – 207 (2006).
- [2] Cantarella, G., Vogt, C., Hopf, R., Münzenrieder, N., Andrianakis, P., Petti,

L., ... & Salvatore, G. A. (2017). Buckled thin-film transistors and circuits on soft elastomers for stretchable electronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(34), 28750–28757.

- [3] Chan Woo Park *et al.* Stretchable active matrix of oxide thin-film transistors with monolithic liquid metal interconnects. 2018 *Appl. Phys. Express* 11 126501
- [4] Oh, H., Oh, JY., Park, C.W. et al. High density integration of stretchable inorganic thin film transistors with excellent performance and reliability. *Nat Commun* 13, 4963 (2022).
- [5] Wang, W., Wang, S., Rastak, R. et al. Strain-insensitive intrinsically stretchable transistors and circuits. *Nat Electron* 4, 143 – 150 (2021).