



## 투명 산화물 반도체의 개요 및 응용

글 \_ 박경, 권장연\*  
연세대 글로벌융합기술원  
연세대 글로벌융합공학부\*

### 1. 서론: 기존 디스플레이 소자의 한계

기존 디스플레이 제품은 주로 비정질 Si를 이용하여 구현되어 왔다. 하지만, 이러한 비정질 Si 기반 소자는 대표적으로 dangling 결합으로 인한 낮은 전자이동도 ( $< 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )가 차세대 고해상도 및 고성능 소자 구동에는 적합하지 않는 문제에 직면하였다. 해상도가 높아지기 위해서는 단위면적당 픽셀의 크기가 작아지는 동시에 개수는 많아져야 한다. 픽셀의 크기가 작아짐에 따라 발생할 수 있는 전기적 저항 증가는 전기 신호의 이동속도 감소를 유발하고 이는 동영상 재생에 문제를 발생시킨다. 즉, 1개의 TFT가 동작하는 시간 (TFT turn-on-time)이 줄어들어야 하는데, 이를 위해서는 TFT 소자의 전자이동도 증가는 필수적이다. 따라서, Fig. 1에서 확인할 수 있듯

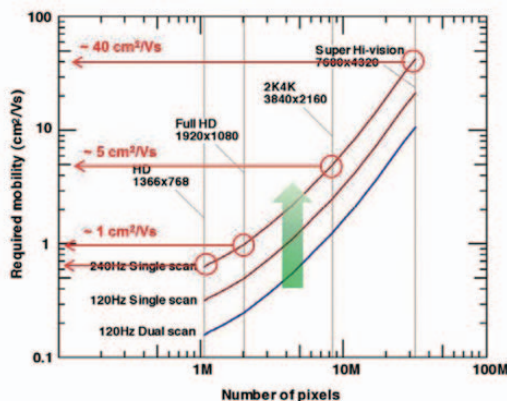


Fig. 1. 스캔 속도와 해상도에 따른 전자이동도 변화.<sup>1)</sup>

이 고해상도 및 고성능 소자의 구현을 위해서는 높은 전자이동도가 요구된다.

또한, 역동적인 고화질을 대면적에서 구동시키기 위해서는 full-HD (high definition)급 해상도 이상의 4k x 2k (2160 x 3840) 픽셀 (Fig. 2)과 240 Hz 이상의 프레임 스캔 속도 (Fig. 3)가 필요하다. 이를 위해서는 최소  $5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 전자이동도가 필요하며, 더 나아가 향후에는 디스플레이 소자 제작에 있어서 약  $40 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  이상의 전자이동도가 요구될 것으로 예상되며, 보다 현장감 있고 생동감 넘치는 화면 구현을 위해서는 초당 보여지는 화면 장수 (구동 속도)를 점차 증가시켜서 Fig. 3에서와 같이 이전 이미지의 잔상이 겹쳐보이는 이미지 겹침현상 (blur)을 현저하게 감소시킬 필요가 있다.

하지만, 기존 Si 기반 TFT 소자의 낮은 전자이동도는 위와 같은 요구 조건을 충족시키지 못할 뿐만 아니라, 비

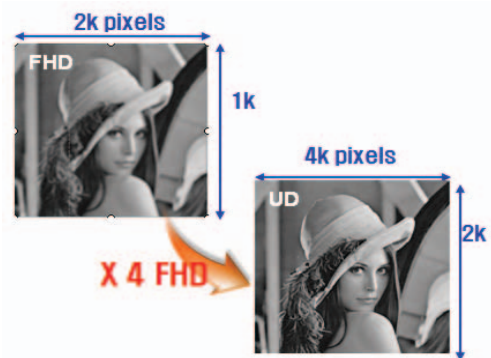


Fig. 2. FHD (full high-definition)에서 UD (ultra-definition)로의 해상도 변화에 따른 화질 비교.

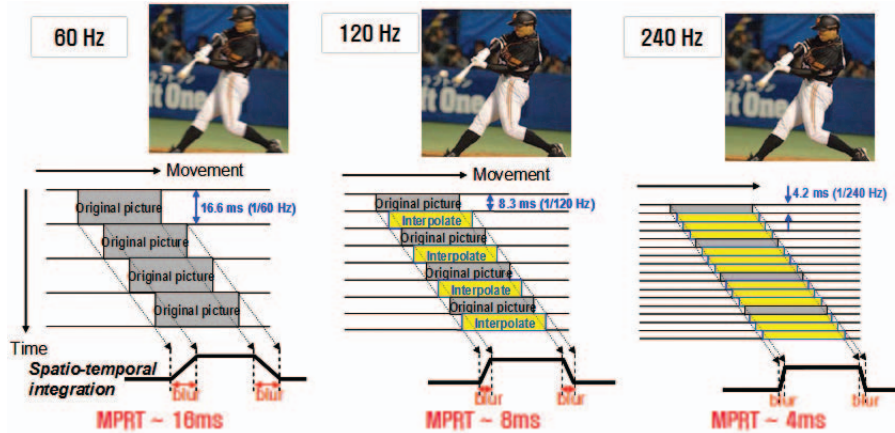


Fig. 3. AMLCD의 구동 속도에 따른 동영상 특성 비교

정질 Si 박막 트랜지스터 (thin film transistor)의 경우, 구동 시간에 따라 문턱 전압 ( $V_{th}$ )의 심각한 이동이 발생하는 안정성 및 신뢰성 문제가 나타났다.<sup>2)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위해 고이동도를 가지는 다결정 Si이 대체 방안으로 제안되었으나, 결정화에 필요한 고가의 장비로 인한 공정 비용 상승과 grain boundary로 인한 non-uniformity 문제는 디스플레이의 픽셀 사이의 밝기 차이를 유발하여 디스플레이에 적용하기 어려운 단점이 존재한다. 더군다나 Si 기반 공정은 필수적으로 고온의 열처리 공정을 필요로 하는데, 이와 같은 고온 공정은 향후 플렉시블 디스플레이와 같은 차세대 유연성 소자 적용에 한계로 작용한다.

## 2. 산화물 반도체의 필요성

위에 언급한 내용대로 Si은 차세대 전자기기에 적용이 어렵기 때문에 이러한 Si 기반의 TFT의 한계를 극복하고 차세대 전자기기에 요구되는 특성의 대부분을 만족하는 산화물 반도체의 필요성이 대두되었다. 대부분의 산화물 반도체는 비정질임에도 불구하고 높은 전자이동도 ( $>10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )를 나타내기 때문에 전자이동도를 높이기 위한 별도의 결정화 또는 불순물 도핑 공정을 필요로 하지 않아 추가적인 공정 비용 상승의 문제가 없으며, 박막의 비정질 특성으로 인한 우수한 균일도 특성으로 대면적 구현이 가능하다는 장점을 가진다. 또한 기존 Si 공정

라인을 거의 그대로 사용할 수 있기 때문에 새로운 설비에 대한 투자 비용이 절감되는 효과도 기대된다.<sup>1,3)</sup> 특히, 기존의 Si 반도체는 약 1.2 eV의 밴드갭 (band-gap)을 가지기 때문에 밴드갭 이상의 에너지를 가지는 가시광선 영역의 빛이 조사되었을 때, 가전자대 (valence band)의 전자가 전도대 (conduction band)로 여기 되는 현상으로 인해 대부분의 빛 에너지가 흡수되어 투과도가 떨어지는 문제가 있는 반면에 산화물 반도체는 3 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가지기 때문에 가시광선의 흡수가 거의 일어나지 않아 투명 소자 제작이 가능하다.<sup>4)</sup>

최초의 산화물을 이용한 TFT 소자는 Klasense와 Koelmans가  $\text{SnO}_2$ 를 이용한 것이다.<sup>5)</sup> 이 연구는 강유전체 성질을 갖는 게이트 절연막에  $\text{SnO}_2$  산화물 반도체를 적용하여 메모리 소자로 사용하기 위한 목적이었지만,  $I_{on}/I_{off}$ 가  $10^2$  정도로 소자 특성은 좋지 못했다. 본격적인 산화물 TFT에 대한 연구는 ZnO를 기반으로 한 TFT가 우수한 소자 특성을 보여주면서 실제 디스플레이에 적용이 가능한 기술로 주목 받기 시작했다. 현재 실제로도 많은 연구가 진행되어 기존 Si TFT에 비해 산화물 TFT의 특성이 거의 모든 면에서 우수하다고 보고되었다 (Table 1). 이러한 산화물 반도체 중에 가장 대표적인 물질인 ZnO는 높은 전기전도도와 넓은 밴드갭 에너지 (~3.4 eV)를 가지며 지구상에 풍부하게 존재하기 때문에 다른 산화물 반도체에 비해 비교적 가격이 낮고, 인체에 무해하다는 장점들로 많은 주목을 받았지만, 다결정 특성으

Table 1. 비정질 Si, 다결정 Si 및 산화물 TFT의 특성 비교<sup>1)</sup>

	a-Si:H	Poly-Si (LTPS/HTPS)	Amorphous oxide
Generation	> 10G	4G/8G?	8G
Channel	a-Si:H	ELA/SPC	a-InGaZnO <sub>4</sub>
TFT masks for LCD/ OLED	(3)4-5/6-7	5-9/7-11	4-5/6-7
Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs <sup>-1</sup> )	< 1	30->100	1-20(100?)
TFT uniformity	Good	Poor/better	Good
TFT polarity	n-ch	CMOS	n-ch
Pixel circuit for OLED	Complex (ex. 4T2C)	Complex (ex. 5T2C)	Simple (2T+1C)
Cost/yield	Low/high	High/low	Low/high
V <sub>s</sub> shift	> 10V	< 0.5V	< 1V
Light stability	Poor	Good	Superior to a-Si
Circuit integration	No	Yes	Yes
Process T	150-350 °C	250-550 °C	RT-400(600) °C
Display mode	LCD, OLED(?)	LCD, OLED	LCD, OLED, E-paper
Substrate	Glass, metal, (plastic)	Glass, metal, (plastic)	Glass, metal, plastic
Solution process, printing	No	Laser annealed	270-400 °C

로 인해 대면적 디스플레이 적용에 한계를 나타내었다.

이러한 단점을 극복하고자 ZnO에 In과 Ga를 추가한 비정질 InGaZnO 물질이 2004년 일본 동경공대 연구진에 의해 제안되었고<sup>3)</sup>, 기존 산화물 반도체의 특성을 능가하는 우수한 특성으로 현재까지도 많은 연구가 집중되고 있다 (Fig. 4). 비정질 InGaZnO에서 In은 이동도 증가의 역할을 하고, Zn는 네트워크 안정제 역할, Ga은 carrier 억제에 역할을 해서 산화물 반도체 중에 가장 우수한 신뢰성을 갖는 것으로 보고되었다.<sup>6)</sup> 동시에 10 cm<sup>2</sup>/Vs 이상의 높은 전하이동도를 갖기 때문에 TFT 특성 최적화에 용이하여 삼성과 LG 등과 같은 대기업에서 집중적으로 연구 및 개발이 진행되어 왔다.<sup>7-9)</sup>

### 3. 산화물 반도체의 연구동향

Fig. 5는 2000년부터 2010년까지 발표된 투명 비정질 산화물 반도체 기반의 TFT 관련 논문의 연간 발표수를 나타낸 그래프이다. ZnO와 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 기반으로 매우 다양한 물질들을 사용한 산화물 TFT의 특성이 보고되고 있는데, 이는 일반적으로 ZnO와 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 Zn-In-O와 Zn-Ga-O와 같은 binary 산화물은 특정 한계점을 넘지 않는 비율 내에서 비정질 상을 유지할 수 있기 때문에 새로운 소재의 개발이 용이하기 때문이다. 산화물 TFT를 이용한 최초의 AMOLED 시제품은 2007년 LG전자에 의해 SID 학회에서 발표되었다 (Fig. 6).<sup>11)</sup>

LG 전자는 같은 해 8월에 개최되었던 IMID 학회에서 0.1 mm 두께의 스테인레스 포일을 기판으로 사용한 3.5 인치 플렉시블 AMOLED를 제작하여 기판이 휘어진 상

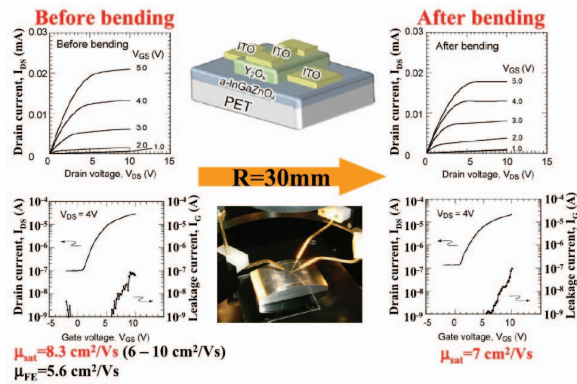


Fig. 4. 플렉시블 기판 위에 산화물 반도체를 이용한 투명 TFT 소자. Bending 테스트 이후에도 전하이동도가 약 7 cm<sup>2</sup>/Vs로 유지.<sup>1)</sup>

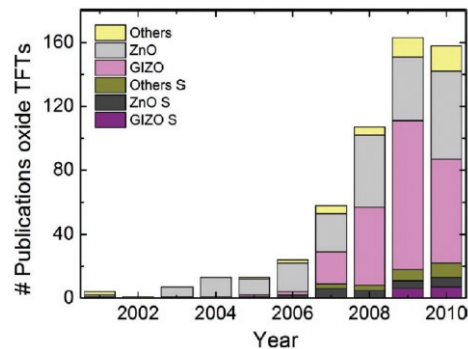


Fig. 5. 2000년부터 2010년까지의 산화물 반도체 TFT 관련 논문의 연간 발표 수.<sup>10)</sup>

태에서도 동작 구현이 가능함을 시연하였다 (Fig. 7).

한국전자통신연구원에서는 2008년 ALD로 증착한 ZnO를 이용하여 2.5인치 투명 AMOLED를 발표하였다.<sup>12)</sup> LG 전자와 한국전자통신연구원에서 발표된 산화물 반도체는 모두 top-gate 구조를 채택하였다.

Top-gate 구조는 게이트 절연막이 반도체 층을 보호하기 때문에 별도의 보호막 없이도 외부 환경에 대해 안정성이 높은 동시에 전하이동도가 높은 장점을 가지고 있다. 반면, 삼성 SDI에서는 bottom-gate 구조를 채택하여 full-color 12.1인치 AMOLED 패널 시제품을 2008년 SID 학회에서 발표하였다.<sup>13)</sup> Bottom-gate 구조는 반도체 층이 외부로 노출되어 외부 환경에 민감하기 때문에 별도의 보호막이 필요하며, top-gate 구조에 비해 전하이동도가 감소한다는 문제점이 존재하지만, 기존 비정질 Si



Fig. 6. 산화물 반도체 TFT를 이용한 3.5인치 AMOLED 패널.<sup>11)</sup>



Fig. 7. 산화물 반도체 TFT를 이용하여 구현한 3.5인치 플렉시블 AMOLED 제품.

기반의 공정과 유사하기 때문에 별도의 추가 장비 구입 없이도 용이하게 소자 제작이 가능한 장점으로 인하여 실제적으로 많이 적용되고 있다. 제작된 소자 성능은  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 전하이동도와  $0.27 \text{ V/decade}$ 의 게이트 스윙,  $10^9$  이상의  $I_{on}/I_{off}$ 를 나타내었으며, 실제 WXGA (1280 x RGB x 765)급 해상도를 나타내었다. 이는 노트북에 채용 중인 TFT-LCD 패널의 해상도와 동일한 수준으로 고품위의 화질특성을 제시하였다 (Fig. 8). 이후에는 디스플레이의 해상도와 크기를 늘리는 방향으로의 개발이 지속적으로 진행되고 있다.

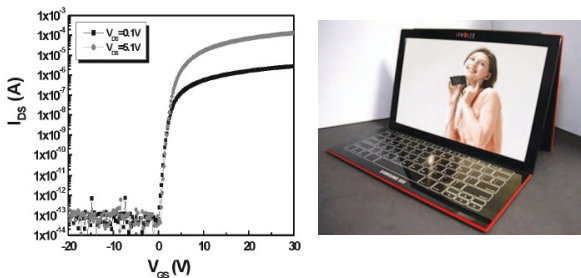


Fig. 8. Bottom-gate 구조의 IGZO TFT의 전기적 특성과 12.1인치 AMOLED 패널.

### 4. 투명전자 소자

현재까지 산화물 반도체의 우수한 특성을 이용한 다양한 제품들이 발표되고 있다. 이와 발맞추어 넓은 밴드갭으로 인한 산화물 반도체의 투명성을 적극적으로 활용하면 전자제품, 수송산업 및 군사용 제품에 적용이 가능할 것으로 예상된다.

그 중에서 가장 핵심적인 분야는 투명 디스플레이 분야라고 할 수 있다. 투명 디스플레이 소자가 실제 전자기에 적용이 가능하면 단순한 창 역할에서 정보 인식/정보 처리/정보 전달의 기능을 가지고 있는 스마트 창으로의 역할 변경이 가능해진다. 이러한 스마트 창은 용도에 따라 그 기능성을 특화 시켜 사용될 수 있다. 또한 스마트 창 이외에도 투명 디스플레이는 다중 중첩 혹은 3-D 디스플레이의 구현도 가능하다.

또한 디자인적인 측면에서도 투명한 기기의 성질을 이용하면 기존 디스플레이를 소비자의 요구에 따라 새로운 제품으로 만들어 낼 수도 있다.

이 밖에도 투명센서나 투명통신장치 등에 적용하여 군사용 혹은 보안장치를 제조할 수도 있으며 유비쿼터스 시대에 걸맞도록 장치의 투명성을 이용하면 공간적/시간적 제약 없이 사용할 수 있기 때문에 미래 IT 분야에 있어서 반드시 필요한 소자가 될 것으로 예상되며, 향후 디스플레이 시장에 대한 분석에서도 투명 디스플레이 시장은 점차 확대될 것으로 보고되었다 (Fig. 9).

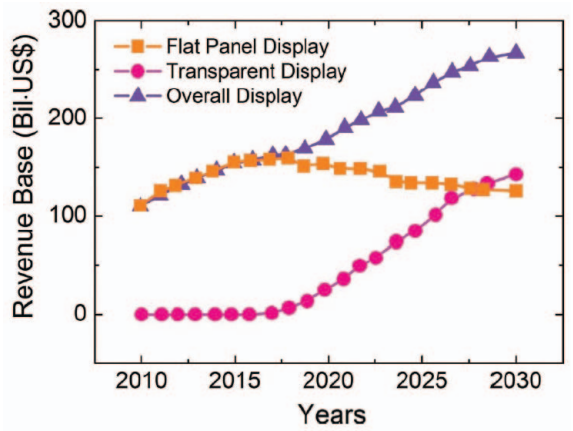


Fig. 9. 투명 디스플레이 시장의 예상 성장도.<sup>14)</sup>



## 5. 투명전자소자용 소재의 필요조건

이러한 투명전자소자의 구현을 위해서는 TFT 소자의 구성 요소인 반도체, 절연체 및 전극의 재료 기술과 투명 TFT 소자를 제작하기 위한 공정 기술 및 구조설계 기술 등이 필요하다. 따라서 앞서 언급하였듯이 3 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가지는 ZnO 및 InO, GaO, SnO 등의 산화물 반도체가 가시광선 영역에서 투명하다는 특성 때문에 투명전자소자에 적극적으로 활용이 가능할 것으로 예상된다 (Fig. 10).<sup>15)</sup> 현재까지 연구되어 온 수많은 산화물 반도체 재료 중에서 가장 안정적이고 성능이 뛰어난 반도체 성능을 나타내는 재료에 대해서는 아직 좀 더 많은 재료 연구와 공정 기술 연구가 필요한 상황이다. 또한 현재 주목 받고 있는 대부분의 산화물 반도체는 n형 특성을 나타내고 있기 때문에 CMOS 형태의 투명전자소자 제작이 불가능하다. 따라서 p형 특성을 가지는 산화물 반도체가 구현되면 CMOS 형태의 투명전자소자의 제작이 가능하고 OLED 구동에도 유리한 측면이 많기 때문에 도핑 조절 혹은 신물질 개발 등을 통해 p형 투명 반도체 소재를 찾는 연구가 활발히 진행 중에 있다.<sup>16)</sup> 절연체의 경우에는 새로운 소재를 개발하는 것보다는 지금까지 활용되어 온 소재 중에서 투명 산화물 반도체와 같이 사용되어 우수한 특성을 나타내는 실리콘 산화막이나 실리콘 질화막이 가장 주목 받고 있다. 전극의 경우에는 지금까지 우수한 특성으로 인해 가장 많이 사용되어 온 ITO가 있지만, In 자원 문제로 인한 가격 문제로 이를 대체하기 위한 투명전극 소재의 연구가 활발하다.

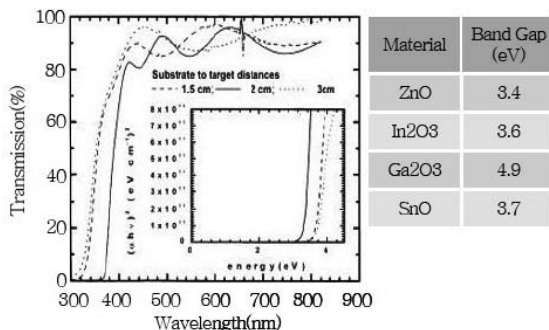


Fig. 10. 각종 산화물 반도체의 광학적 특성 (밴드갭과 투과도).<sup>15)</sup>

하지만, 투명전자소자를 구성하는 반도체, 절연체 및 전극이 모두 산화물로 구성되기 때문에 wet-etching 공정에 필요한 선택비를 확보하는 것이 어렵다. 또한, 대부분의 산화물은 특성 향상을 위한 열처리 공정이 반드시 필요하기 때문에 플렉시블 기판에의 적용을 위해서는 공정 온도를 낮추는 것이 필수적이다.

## 6. 투명 산화물 반도체 TFT 소자의 신뢰성 문제

투명 TFT 소자 기술에서 가장 중요한 부분은 반복적인 소자 구동에 따른 각종 스트레스 환경에서의 소자 신뢰성 확보이다. 디스플레이용 TFT는 구동 환경에서 bias stress와 light illumination stress가 동시에 존재한다. 따라서 이 두 가지 조건이 동시에 가해졌을 경우를 평가하는 것이 정확하지만, 기존 비정질 Si TFT의 경우에는 두 가지 조건에 대해 서로 독립적으로 평가가 이루어져 왔다. 그 이유는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 비정질 Si의 경우, bias stress와 light stress에 의한 소자 특성 저하가 발생하지만 이 두 가지 stress를 동시에 가했을 경우에 특성 저하가 가속화되는 현상이 발견되지 않았기 때문이다. 이러한 사실을 통해 bias stress와 light stress가 소자 특성 저하에 독립적인 영향을 준다고 추측된다. 하지만 산화물 반도체 TFT의 경우, bias와 light를 동시에 인가했을 경우에 어느 한 쪽의 stress만을 가했을 경우보다 급격한 소자 신뢰성의 저하가 나타났다 (Fig. 12). 결과적으로 투명 산화물 반도체 TFT의 신뢰성 평가를 위해서는 bias와 light가 동시에 가해진 상황인 전기광학 신뢰성 (Bias Illumination Stress: BIS) 평가가 반드시 이루어져야 한다.

산화물 반도체 중에서 가장 주목을 받고 있는 IGZO를 이용하여 bias stress와 light stress를 동시에 가해졌을 경우가 연구되었다. 실험에 사용된 ITO 전극을 이용한 IGZO TFT 소자의 구조와 기본적인 전기적 특성을 Fig. 13에 나타내었다.

가시광선 영역에서의 투명도를 측정된 결과, 약 80% 이상의 투과도를 나타낸 반면에 Mo 전극을 사용한 소자

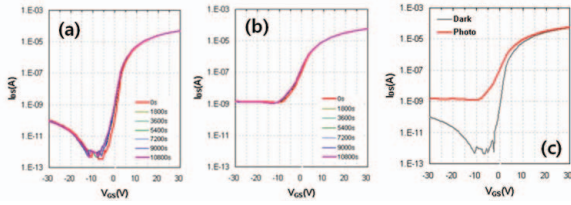


Fig. 11. 기존 비정질 Si TFT의 신뢰성 테스트 결과: (a) bias stress, (b) light stress, 및 (c) bias와 light stress가 동시에 가해졌을 경우.

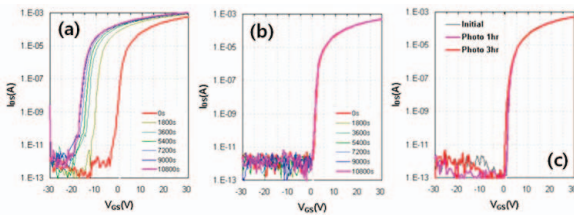


Fig. 12. 산화물 반도체 TFT의 신뢰성 특성 결과: (a) bias stress, (b) light stress, 및 (c) bias와 light stress가 동시에 가해졌을 경우.

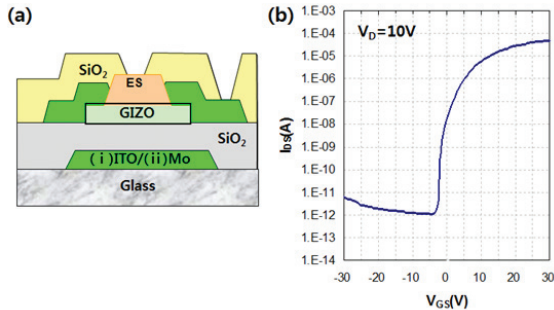


Fig. 13. Mo (불투명)과 ITO (투명) 전극을 이용한 IGZO TFT의 소자 구조 및 투명 IGZO TFT의 전기적 특성.

는 약 60%의 투과도를 나타내었다. 따라서 기존 Mo 전극은 투명 소자 구현에 제약이 있는 반면에 ITO 전극을 사용한 소자는 투명 소자 구현에 적합한 것을 알 수 있었다. Negative BIS (NBIS) 테스트 결과, 빛의 세기가 1,000 nit 이하에서는 ITO와 Mo 전극 소자 모두에서 별다른 특성 변화가 나타나지 않았지만, 빛의 세기가 1,000 nit 이상으로 강해지면 ITO 전극을 사용한 투명 IGZO TFT 소자는 급격한 off-current 증가로 인한 소자 특성 열화가 발생하였다. 이에 반해 Mo 전극을 사용한 불투명한 IGZO TFT는 별다른 특성 변화가 나타나지 않았다 (Fig. 14). 이러한 결과는 불투명한 소자의 경우에 가해지는 빛

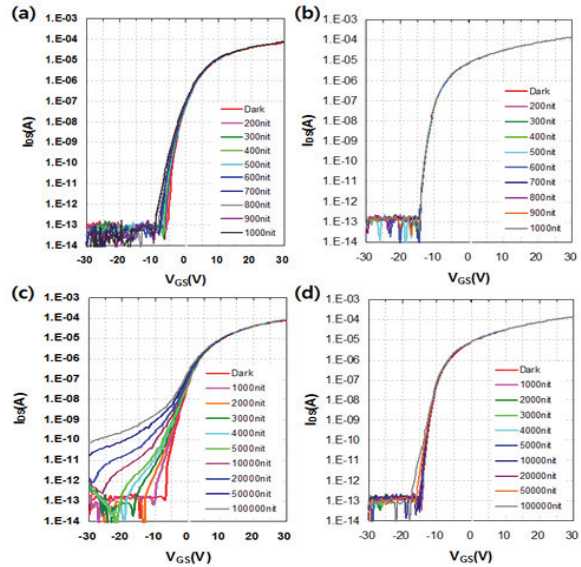


Fig. 14. NBIS에 따른 IGZO TFT 소자 특성 변화: (a) 1,000 nit 이하의 투명 소자, (b) 1,000 nit 이하의 불투명 소자, (c) 1,000 nit 이상의 투명 소자, 및 (d) 1,000 nit 이상의 불투명 소자.

의 일부가 불투명 전극에 의해 반사가 일어나기 때문에 빛에 대한 산화물 반도체의 노출이 적은 반면에, 투명한 소자의 경우에는 가해지는 빛의 대부분이 투명전극을 통과하여 산화물 반도체에 직접적으로 노출이 되었기 때문이다. 따라서 빛에 직접적으로 노출되는 투명소자는 빛에 의해 발생되는 photo-electron이 불투명소자에 비해 더 많이 생성되고, 이러한 photo-electron은 소자의 off-current 증가를 발생시켜 급격한 소자 특성의 열화를 가져온다. 따라서 투명 소자의 실용화를 위해서는 위와 같은 투명 산화물 반도체 TFT 소자의 신뢰성 개선이 무엇보다 필요하다.

## 7. 결론

기존 Si 기반 TFT 소자의 한계를 극복하기 위한 대체 물질로 주목 받은 산화물 반도체는 Si 기반 TFT에 비해 빠른 전자이동도를 나타낼 뿐만 아니라 저온 공정이 가능하며 상온에서도 비정질 상태를 유지하기 때문에 대면적 적용이 용이하며 플렉시블 기판에 적용도 가능하였다. 또한 넓은 밴드갭을 가지기 때문에 투명전소자에의 응

용이 가능하다. 이러한 우수한 특성의 산화물 반도체를 이용하여 국내 여러 기업과 연구소가 고성능의 시제품을 여러 디스플레이 분야 우수 학회에 선보이고 있어서 기술 응용 분야에 있어서는 우리나라가 세계에서 가장 뛰어난 성과를 보이고 있다. 하지만, 뛰어난 응용 기술력에도 불구하고 원천 소재에 대한 것은 미국과 일본 등의 선진국에 의존하고 있는 상황으로 원천 기술 확보에 대한 연구가 절대적으로 필요하다. 특히 투명전자소자 분야의 경우, 짧은 연구 기간에도 불구하고 상당히 많은 양의 원천 특허가 이미 설정된 상황이다. 하지만, ZnO 기반 투명 반도체 소재의 경우, 기존 3성분계 산화물 반도체에 추가적인 치환을 통하여 n-형 또는 p-형 전기 전도 특성을 개선하는 부분이 아직까지는 취약하며, 비 ZnO 기반의 투명 반도체 소재의 경우에는 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 SnO<sub>2</sub> 등의 산화물 반도체에 조성 조절/도핑 치환 등을 통한 특성 개선 분야의 연구가 아직까지 부족한 상태이다. 반도체 이외에도 누설 전류 개선과 관련된 물질 도핑, 보호막 증착 및 고유전율 복합 박막 형성 등을 통한 절연막 특성 향상에 대한 연구도 주목 받고 있다. 전극용 재료에 대해서는 기존 ITO를 대신하여 이미 널리 알려진 ZnO 기반에 Al, Ga, In 또는 B 등을 첨가하여 특성을 개선시키는 방법 이외에 추가적인 도핑이나 구조적인 치환을 통하여 안정적 특성을 보이는 재료에 대한 개발이 필요하다.<sup>15)</sup>

무엇보다도 산화물 반도체를 이용한 투명전자소자에서 발생할 수 있는 신뢰성 문제에 대한 원인 규명 연구를 바탕으로 문제 해결 방안의 제시가 필요하다. 또한 산화물 반도체 재료가 디스플레이 분야 이외에도 산소 센서 또는 수분 센서로도 이용된다는 사실을 고려하면 기존 빛과 바이어스 및 온도 스트레스에 추가하여 대기 중의 산소 및 수분 등의 외부 환경 요소에 대한 소자 신뢰성까지 폭넓게 고려되어야만 총체적인 산화물 반도체 TFT 소자의 열화 메커니즘에 대한 이해가 가능할 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, "Present Status of Amorphous In-Ga-Zn-O Thin-film Transistor," *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **11** [4] 1 (2010).
2. 이상렬 and 조경철, "차세대 디스플레이 백플레인용 산화물 TFT 기술," *전기의 세계*, **58** [10] 20-27 (2009).
3. K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, "Room Temperature Fabrication of Transparent Flexible Thin-film Transistors Using Oxide Semiconductors," *Nature*, **423** 488-92 (2004).
4. D. P. Notron, "Synthesis and Properties of Epitaxial Electronic Oxide Thin-film Materials," *Mater. Sci. Eng. R.*, **43** [5-6] 139-297 (2004).
5. M. W. J. Prins, K. -O. Grosse-Holz, G. Muller, J. F. M. Cillessen, J. B. Giesbers, R. P. Weening, and R. M. Wolf, "A Ferroelectric Transparent Thin-film Transistor," *Appl. Phys. Lett.*, **68** 3650 (1996).
6. H. Hosono, "Ionic Amorphous Oxide Semiconductors: Material Design, Carrier Transport, and Device Application," *J. Non-Cryt. Solids.*, **352** [9-20] 851-58 (2006).
7. H. Yabuta, M. Sano, K. Abe, T. Aiba, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, "High-mobility Thin-film Transistor with Amorphous InGaZnO<sub>4</sub> Channel Fabricated by Room Temperature Rf-magnetron Sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, **89** [11] 112123 (2006).
8. M. Kim, J. H. Jeong, H. J. Lee, T. K. Ahn, H. S. Shin, J. -S. Park, J. K. Jeong, Y. -G. Mo, and M. D. Kim, "High Mobility Bottom Gate InGaZnO Thin Film Transistors with SiO<sub>x</sub> Etch Stopper," *Appl. Phys. Lett.*, **90** [21] 212114 (2007).
9. J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, J. -S. Park, Y. -G. Mo, and H. D. Kim, "High Performance Thin Film Transistors with Cosputtered Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Channel," *Appl. Phys. Lett.*, **91** 113505 (2007).
10. E. Fortunato, P. Barquinha, and R. Martins, "Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances," *Adv. Mater.*, **24** [22] 2945-86 (2012).
11. H. -N. Lee, J. Kyung, M. -C. Sung, D. Y. Kim, S. K. Kang, S. -J. Kim, C. N. Kim, H. -G. Kim, and S. -T. Kim, "Oxide TFT with Multilayer Gate Insulator for Backplane of AMOLED Device," *J. Soc. Inf. Disp.*, **16** [2] 265-72 (2008).
12. S. -H. K. Park, C. -S. Hwang, M. Ryu, S. Yang, C. Byun, J. Shin, J. -I. Lee, K. Lee, M. S. Oh, and S. Im, "Transparent and Photo-stable ZnO Thin-film Transistors to Drive an Active Matrix Organic-Light-Emitting-Diode Display Panel," *Adv. Mater.*, **21** [6] 678-82 (2009).

1. T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, "Present Status of Amorphous In-Ga-Zn-O Thin-film Transistor," *Sci.*



## 특 집 ■■■ 박경, 권장연

- 13. J. K. Jeong, J. H. Jeong, H. W. Yang, T. K. Ahn, M. Kim, K. S. Kim, B. S. Gu, H. -J. Chung, J. -S. Park, Y. -G. Mo, H. D. Kim, and H. K. Chung, "12.1-in. WXGA AMOLED Display Driven by InGaZnO Thin-film Transistors," *J. Soc. Inf. Disp.*, **17** [2] 95-100 (2009).
- 14. DisplayBank, "투명 디스플레이 기술 및 시장 전망" (2011).
- 15. 황치선, 추혜용, 전황수, and 조경익, "투명전자소자의 기술 동향;" *전자통신동향분석*, **22** (2007).
- 16. H. Hosono, "Recent Progress in Transparent Oxide Semiconductors: Materials and Device Application," *Thin Solid Films*, **515** [15] 6000-14 (2007).

### ●● 박경



- 2012년 8월 성균관대학교 신소재공학부 박사
- 2012년 10월-현재 연세대학교 글로벌융합기술원 전임연구원

### ●● 권장연



- 2002년 2월 서울대학교 재료공학부 박사
- 2002년 2월-2010년 1월 삼성종합기술원 수석연구원
- 2010년 2월-2011년 8월 서울대학교 재료공학부 BK조교수
- 2011년 9월-현재 연세대학교 글로벌융합공학부 조교수