

## 기술 특 집

## 산화물 Thin Film Transistor 기술 현황

황 치 선, 박 상 희 (전자통신연구원 투명전자소자팀)

## I. 서 론

최근 들어 산화물 active layer를 가지는 TFT들에 대한 관심이 커지면서 많은 연구가 이루어지고 있다. 이들 산화물은 지금까지 주로 투명전극(TCO; Transparent Conducting Oxide)용으로 이용되어 오던 것들이었다. 그중에서도 ZnO나 IGZO(In-Ga-Zn-O의 화합물)가 가장 널리 연구되고 있으나 이밖에도 ZnSnO, SnO, ITO, IZO 등등 많은 화합물이 실제로 TFT 특성을 보이고 있다.

산화물 TFT는 산화물이 가지는 화학 결합의 특성상 상대적으로 큰 밴드갭(>3eV)을 가지기 때문에 가시광선 영역에서 투명한 특성을 보이고 있다. 이러한 특성 때문에 투명 TFT(TTFT; Transparent Thin Film Transistor)라는 명칭으로도 불리고 있다.

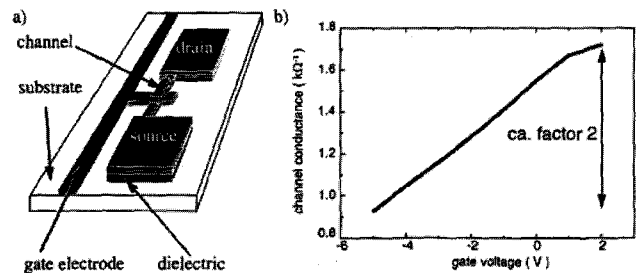
산화물은 오랜 기간 동안 여러 분야에서 응용되고 연구되어 온 물질이지만, TFT에 사용되는 active 물질로 주목을 받게 된 것은 90년대 후반 이후의 일이다.<sup>[1]</sup> 2000년대 이후 주로 고온에서 증착하며 다결정박막 형태인 ZnO 이외에 저온에서 증착되며 비정질 형태인 IGZO가 개발되면서 본격적인 연구가 일어나기 시작했다.<sup>[2]</sup> 특히, AMOLED나 AMLCD의 하판을 구성하는 pixel 구동용 TFT로의 응용 가능성이 제시되면서 연구소나 학계 이외에 기업에서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 우리나라의 경우, 산화물 TFT 연구에 참여한 시기는 늦었지만 기업에서의 적극적인 연구활동의 결과로 특히 AMOLED로의 응용에 있어서는 가장 앞선 결과를 선보이고 있다.<sup>[3-6]</sup>

현재 차세대 디스플레이 소자로서 가장 많은 관심이 집중되고 있는 AMOLED의 pixel 구동 TFT 뿐만 아니라 Flexible Display<sup>[8]</sup>나 투명 전자소자<sup>[9]</sup> 등의 응용가능성도 높기 때문에 산화물 TFT는 앞으로도 많은 연구성과가 기대되고 있다.

본 논문에서는 이러한 산화물 트랜지스터의 최근 연구 현황에 대해서 살펴보기로 한다.

## II. 산화물 TFT의 개발 추이

산화물 TFT는 필립스 연구소에서 1995년경에 산화물 반도체를 Ferroelectric한 게이트 절연막에 적용하여 Memory 소자로 사용하기 위한 목적으로 개발되었다.<sup>[1]</sup> 이때 발표된 TFT의 성능은 on/off ratio가  $10^2$ 에 불과하여 제대로 TFT의 특성을 보인다고 하기 힘든 정도였다.

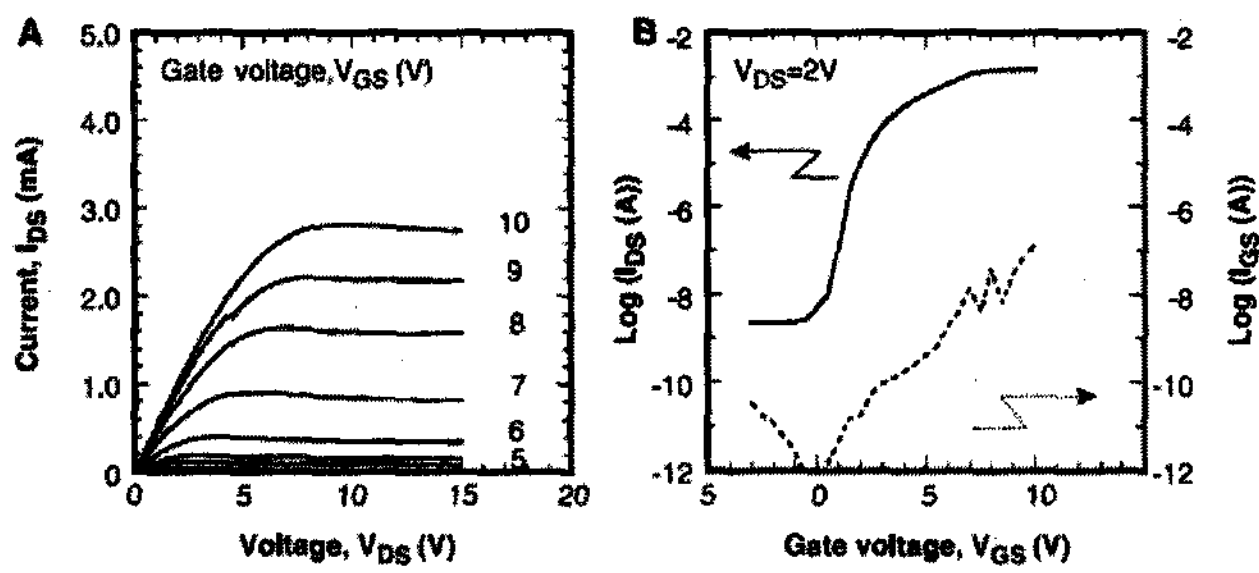


[그림 1] 최초로 개발된 산화물 TFT의 구조와 동작 특성<sup>[1]</sup>

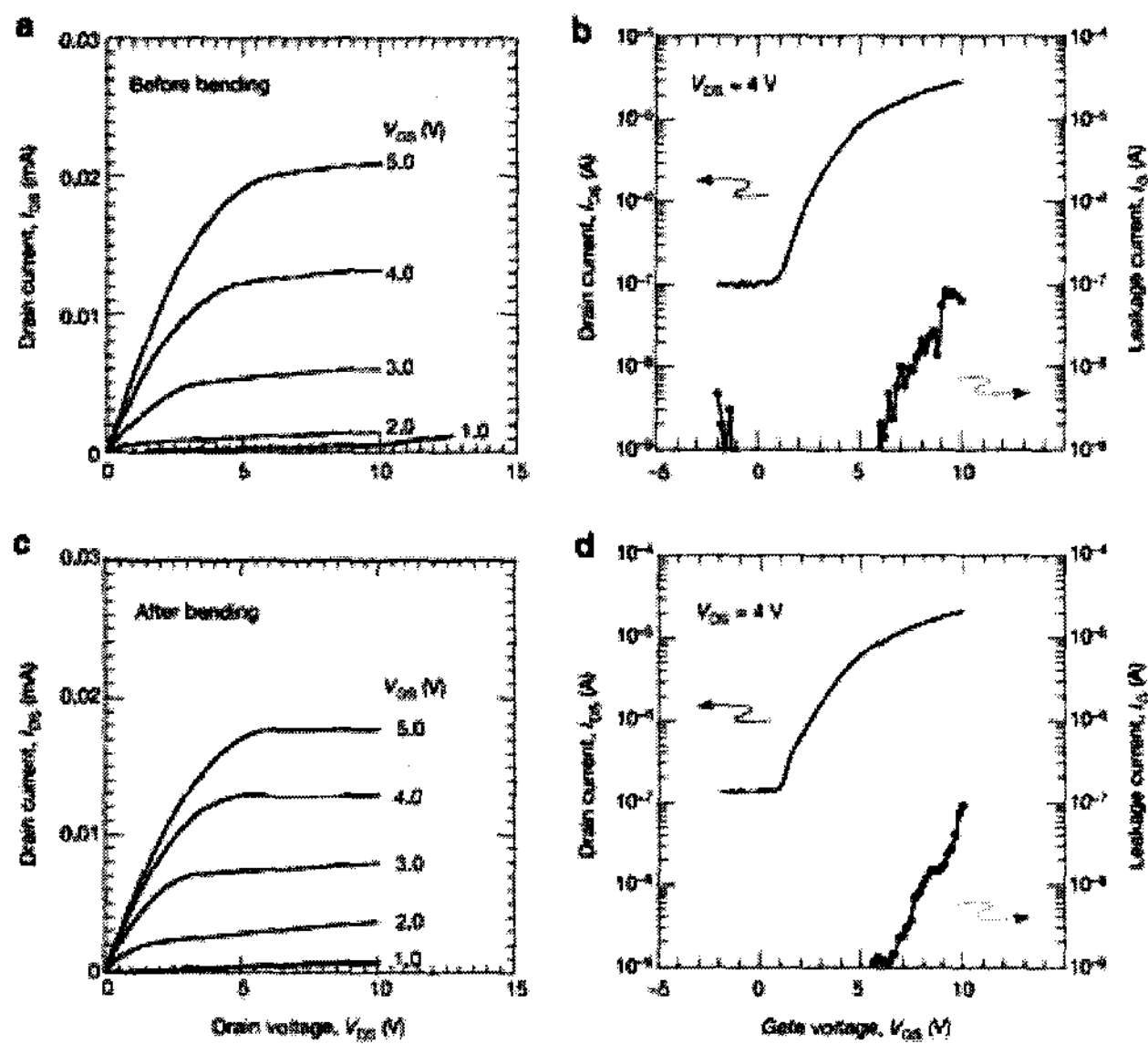
그후 ZnO등을 고온에서 열처리를 적절히 시행하여 결합을 줄일 경우 TFT의 active 물질로서의 역할을 할 수 있는 특성을 보이는 결과가 발표되었다.<sup>[7]</sup> 이러한 연구는 주로 미국 Oregon 대학의 Wager 교수 그룹에 의하여 주도되었다. 전통적으로 ZnO와 같은 산화물의 경우 많은 결합을 내부적으로 가지고 있기 때문에 이를 줄이기 위해서는 상당한 고온(~700°C)에서의 증착 혹은 열처리가 필수적인 것으로 알려져 있었다. 일본 도호쿠대의 카와사키 교수 그룹에 의해 비교적 낮은 온도(~300°C)에서 TFT 특성을 얻기도 하였다.<sup>[8]</sup>

한편, 일본의 동경 공대의 Hosono 교수 그룹에서 InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>5</sub> 결정을 이용하여 대단히 높은 전하이동도를 가지는 TFT<sup>[9]</sup>와 비정질 IGZO 박막을 이용한 TFT를 발표하였다.<sup>[2]</sup>

특히 비정질 IGZO 박막의 경우에는 PLD 방법을 이용하여 상온에서 증착이 가능하기 때문에 플라스틱 기판위에서



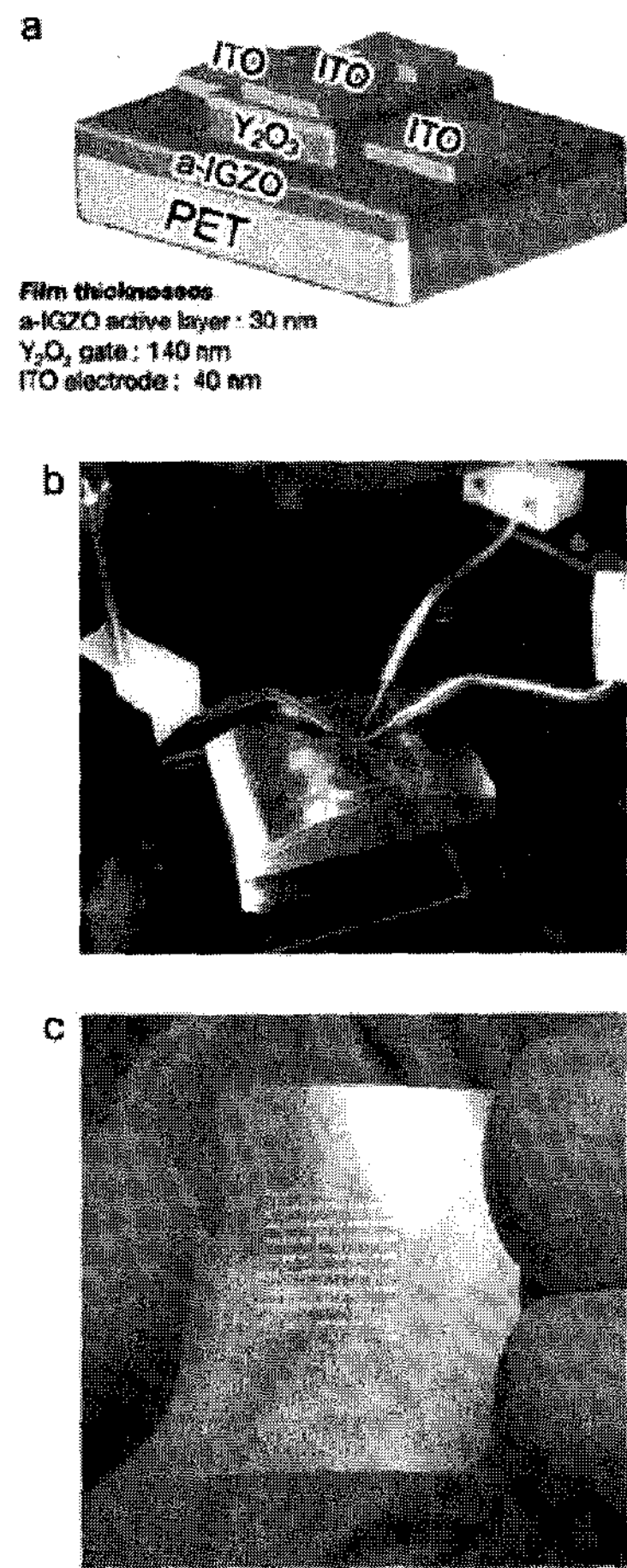
[그림 2] InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>5</sub> 결정으로 제작된 고성능 산화물 반도체 TFT<sup>[9]</sup>



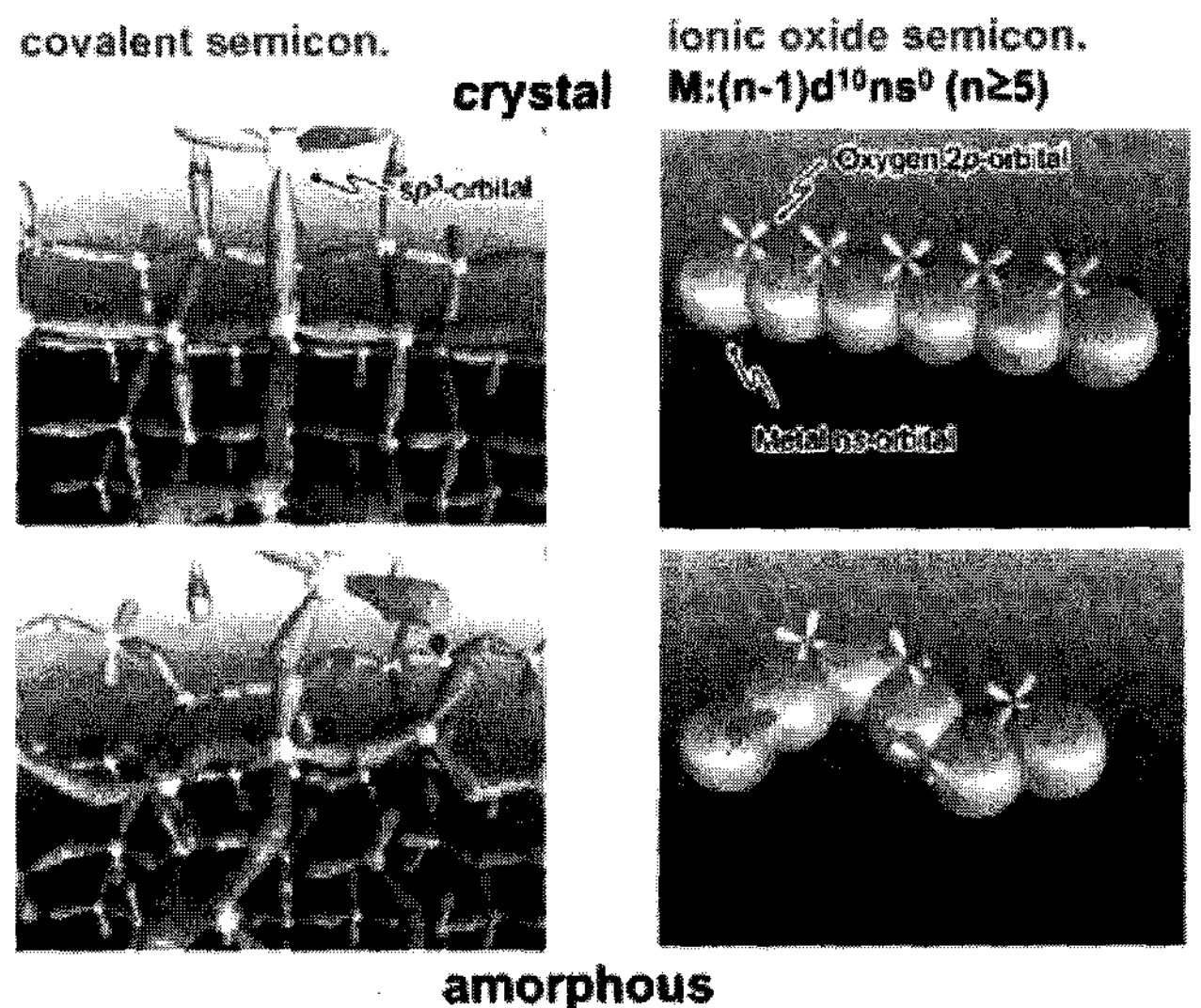
[그림 3a] 비정질 IGZO 박막으로 제작된 산화물 반도체 TFT의 소자 특성<sup>[2]</sup>

도 상당히 좋은 TFT 특성을 보여주고 있다. 이들은 산화물에서 금속의 최외각전자층 s-오비탈의 전자가 전하 수송에 기여하기 때문에 비정질 박막임에도 불구하고 비정질 실리콘에 비하여 상대적으로 높은 전하이동도를 가질 수 있다고 주장하였다.<sup>[2]</sup> 그리고 ZnO 등의 다결정 산화물 박막에 비하여 소자의 높은 이동도 및 균일도 확보 측면에서 재료의 가치 우위를 가질 수 있다는 주장을 하고 있다.

산화물 TFT에 대한 이러한 선행적인 연구 결과를 바탕으로 ZnO와 IGZO를 active로 갖는 TFT에 대해 여러 분야에서 활발한 응용이 진행되었다. 특히 능동 구동형 디스플레이 분야에서 일본의 Casio사가 Kochi 대학과 공동으로 ZnO를 이용하여 AMLCD를 제작하여 시연하였으며,<sup>[10]</sup> Toppan Printing에서는 IGZO를 포함한 TFT로 전자종이를 구현하였다.<sup>[11]</sup> AMOLED쪽에서는 우리나라의 ETRI에서 2005년에 ZnO TFT로 적용 가능성을 세계 최초로 보였고,<sup>[12]</sup> 2006년에는 LG전자에서 IGZO를 이용하여 패널 구현에 성공하였다.<sup>[13]</sup> 현재 AMOLED쪽에서의 응용에서는 SUS 기판을 이용한 플렉시블 AMOLED<sup>[3]</sup>와 투명 AMOLED<sup>[5]</sup>까지 구현에 성공한 상태이다.



[그림 3b] 비정질 IGZO 박막으로 제작된 산화물 반도체 TFT의 소자 구조<sup>[2]</sup>

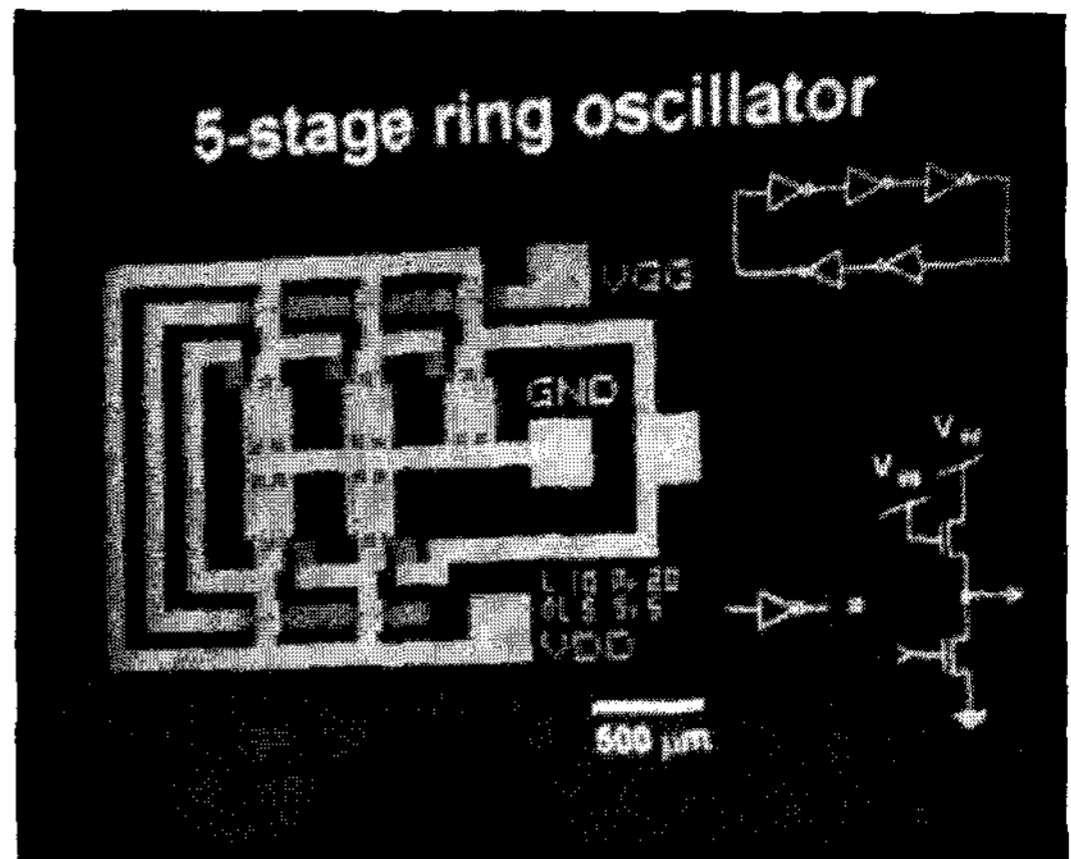


[그림 4] 비정질 IGZO 박막의 전도 특성을 설명하는 모식도<sup>[2]</sup>

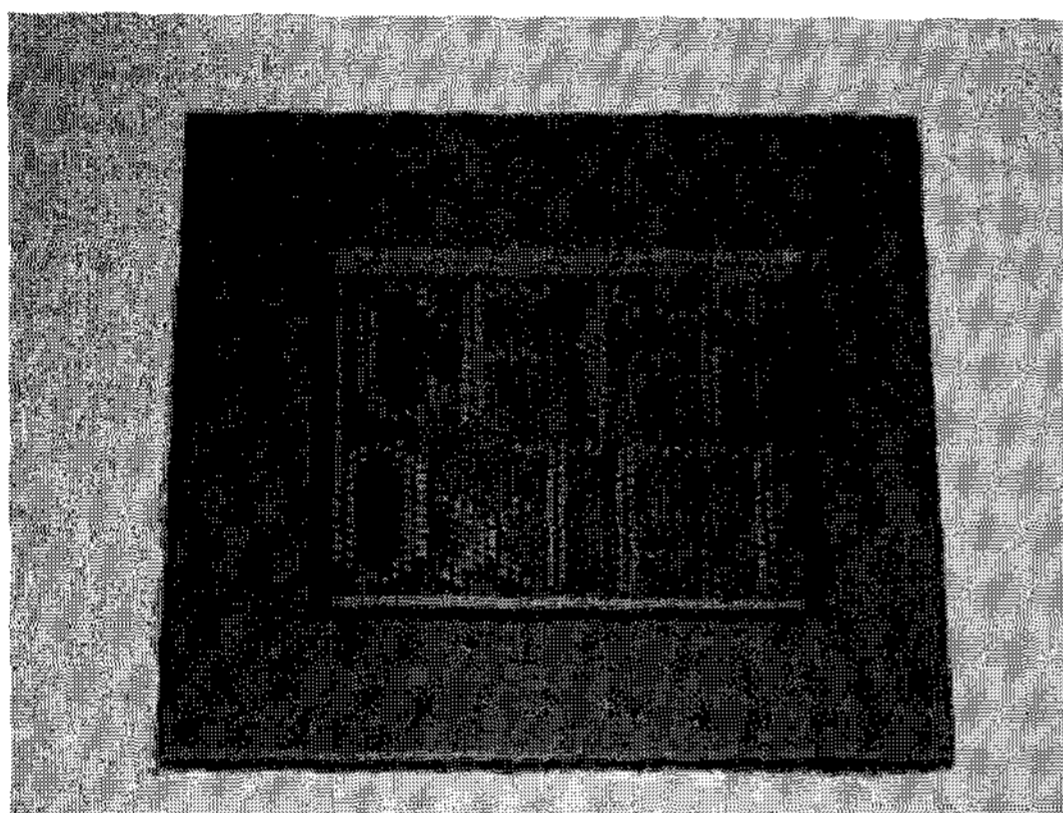
한편 산화물 TFT를 이용한 회로 구현에 대한 시도도 이루어졌는데, 일본의 Canon사에서는 5-stage의 링오실레이터를 구현하여 410KHz의 구동까지 시연해 보였다.<sup>[14]</sup>



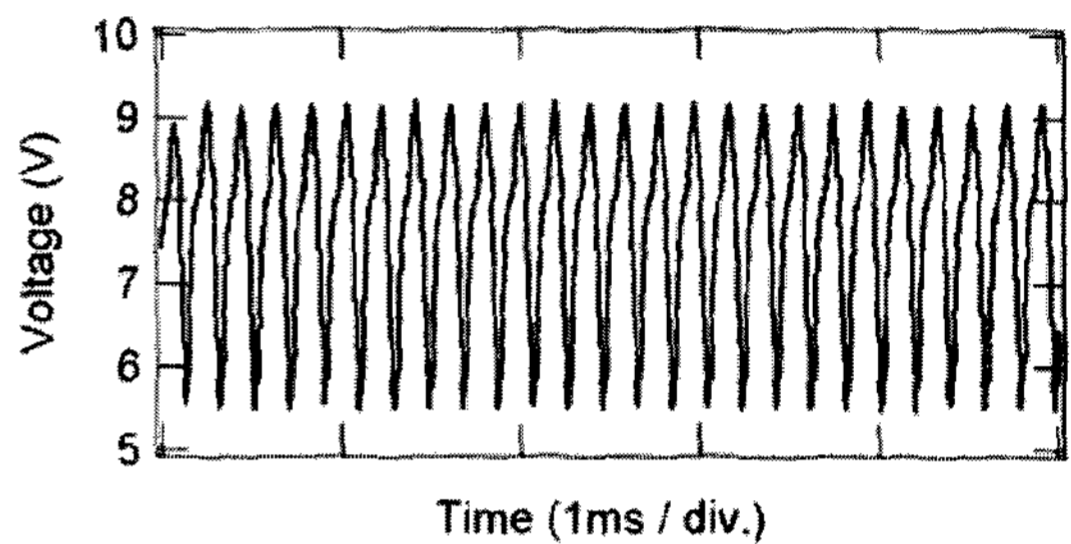
[그림 5] ZnO TFT로 구동된 AMLCD<sup>[10]</sup>



[그림 8a] IGZO TFT로 구현한 링오실레이터의 모식도<sup>[14]</sup>



[그림 6] IGZO TFT로 구동된 전자 종이<sup>[11]</sup>



[그림 8b] IGZO TFT로 구현한 링오실레이터의 동작 특성<sup>[14]</sup>



[그림 7] IGZO TFT로 구동된 AMOLED<sup>[13]</sup>

제작 공정에 있어서도 많은 발전이 이루어졌는데, 현재 일반적으로 널리 사용되는 있는 스퍼터링 증착 방법 이외에도 ALD 방법, PLD 방법, 상압 plasma 방법, MOCVD 방법 등이 사용되고 있으며 용액공정을 이용한 방법까지도 개발되어 있는 상태이다.

아직 구체적인 산업화 계획이 발표된 것은 없지만 AMOLED 분야에서 기존의 poly-Si TFT나 amorphous Si TFT를 대체할 수 있는 가장 유력한 후보로 산화물 TFT가 부각되

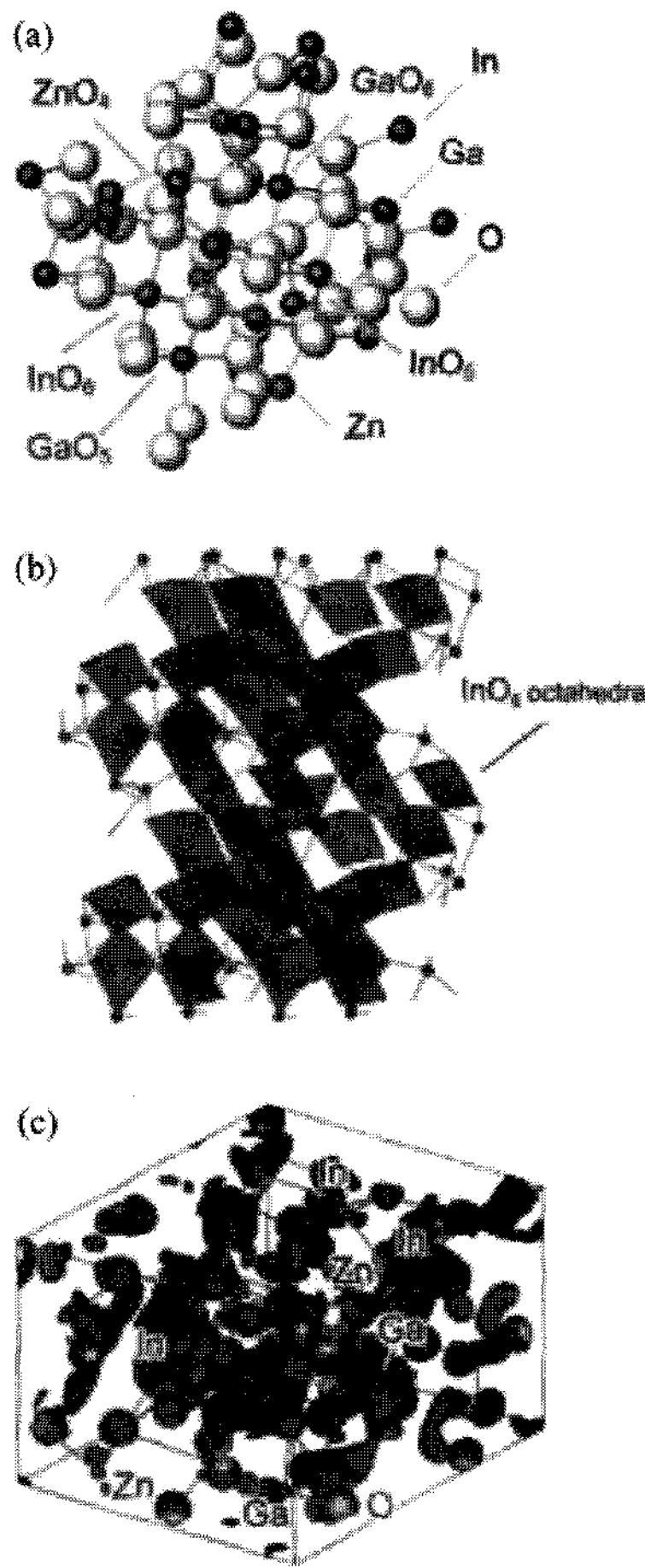
고 있기 때문에, 시장 상황에 따라서 빠른 산업 분야로의 응용도 기대해 볼 수 있다. 우리나라와 일본의 패널 제조 업체에서는 이러한 상황에 맞추어 기술 개발이 활발히 진행되고 있는 상황이다.

### III. 산화물 TFT의 특징

#### 1. 산화물 반도체

산화물 반도체는 구성 원소수에 따라 이성분계, 삼성분계, 사성분계로 나눌 수 있다. 이성분계는 ZnO, SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 있으며, 삼성분계는 IZO, IGO, ZTO 등이, 사성분계는 IGZO, IGTO, IZTO 등이 있을 수 있으나 이밖에 다양한 형태의 조합이 가능하다.

대표적인 산화물 반도체인 ZnO에 대해 간단히 살펴보면, a 축의 격자상수는 3.252Å이고 c 축으로의 격자상수는 5.213Å인 Wurtzite 구조를 가지며, 밴드갭의 크기는 상온에서 3.3eV이다. Exciton의 binding Energy가 60meV로 매우 커서 발광소자로의 응용가능성이 높은 물질이다. 그리고 적당한 성장 조건에서 다양한 나노구조를 쉽게 만들어 낼 수 있어서 나노선, 나노입자, 나노판등이 가능하다. 일반적인 조건에서 성장시키면 n형을 띠게 되는데 그 원인은 O vacancy 혹은 Zn interstitial, 그리고 최근에는 H-doping등이 원인으로 제시되고 있다. Ga, Al 등에 의해 쉽게 doping이 되며 이러한 성질을 활용하여 TCO로 응용하



[그림 9] 비정질 산화물 반도체인 IGZO 물질의 구조<sup>[15]</sup>

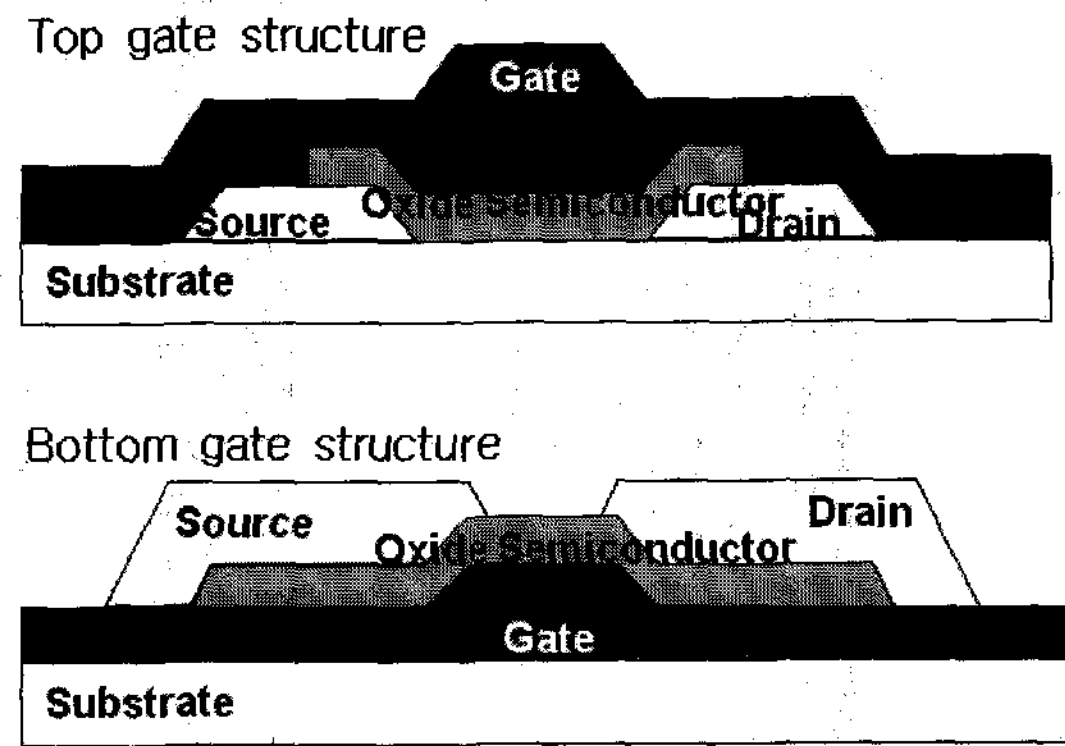
기도 한다. 또한 공기중의 Gas에 대한 반응성이 높아서 Gas Sensor로 쓰이기도 한다.

IGZO는 ZnO, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>들이 산소 원자를 매개로 하여 불규칙적으로 배열되어 있는 것으로 생각할 수 있다. 이때 가장 큰 원소인 In이온의 s-오비탈이 전도도에 기여하는 것으로 생각되고 있으며 ZnO는 이러한 구조체를 만드는 뼈대의 역할을 하고 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 잉여의 전자를 흡수하여 적당한 정도의 전도도를 보이도록 하는 역할을 한다고 한다. 최초로 보고된 IGZO의 경우에는 PLD 방법을 이용했지만, 요즘은 스퍼터링 방법을 사용하여 디스플레이 패널에 적용이 가능한 우수한 소자를 제작하고 있다. 상온에서도 쉽게 다결정형태를 갖는 ZnO와는 달리 IGZO의 경우 500°C 이상의 고온 열처리 이전에는 비정질상태를 유지하는 것으로 알려져 있다.

## 2. 소자 구조 및 공정

산화물 TFT는 4개의 층(게이트 전극, 게이트 절연막, 채널층, 소스/드레인 전극)으로만 구성되어 있으며 제작 공정도 매우 단순하다. 산화물 TFT의 구조는 기본적으로 비정질 실리콘 TFT나 유기 TFT의 구조와 유사한 형태를 하고 있으며 크게 두 가지 구조로 나뉘고 있다.

즉, 게이트 전극이 최하층에 있는 Bottom gate 구조와



[그림 10] 산화물 반도체 TFT의 구조도

게이트 전극이 최상층에 있는 Top gate 구조이다. Bottom 게이트 구조의 경우 채널층이 상부에 위치하기 때문에 후속 공정에 의하여 채널층이 의도하지 않은 변화를 겪을 가능성을 최소화하고 원하는 방향으로 채널층을 후처리하는 것이 가능한 장점이 있다. 그러나 한편 산화물이 수분 등의 주변 환경에 의하여 특성이 바뀔 수 있다고 알려져 있기 때문에 별도의 보호층이 필요하게 되며, 이러한 보호층 형성과정에서 유발되는 산화물 특성변화 및 back-channel 효과 등을 고려해야 한다. 또한 구조에 따라서 TFT에서 가장 중요한 계면으로 알려져 있는 게이트 절연막과 채널층과의 계면에 여러 가지 공정의 영향이 미치게 되는 단점이 있다. 이에 비하여 Top 게이트 구조의 경우 채널층 형성이후에 게이트 절연막 공정등 많은 공정이 이루어지기 때문에 채널층의 성질이 후속 공정에 의하여 많은 변화를 겪게 되는 단점이 있지만, 채널층이 게이트 절연막에 의하여 어느정도 보호가 이루어지기 때문에 환경에 따른 영향이 상대적으로 적고, 채널 보호층을 in-situ로 증착하는 것이 가능하여 채널층과 게이트 절연막의 계면을 깨끗한 상태로 유지하는 것이 가능하다. 현재는 연구그룹들의 공정 능력이나 물질 특성에 따라 선호하는 구조가 나뉘고 있으며 어느 구조가 더 우수한지는 확실하지 않은 상황이다.

소스/드레인과 active layer와의 접촉에 있어, 현재까지는 적당한 도핑 방법이 알려져 있지 않고, 산화물을 이용한 투명전극들, 혹은 Mo등의 금속과 비교적 좋은 Ohmic 접합을 이루고 있기 때문에 별도의 도핑층 없이 채널층이 소스/드레인 전극과 맞닿아 있는 형태를 하고 있다. 일부 연구 그룹에서는 이러한 접촉부에서의 저항으로 소자 특성의 왜곡이 이루어지고 있다는 보고를 하고 있다.<sup>[4]</sup>

Bottom 게이트 구조의 경우 대부분 소스/드레인 전극 형성후에 채널층을 증착하는 Bottom Contact 구조를 사용하고 있다. 이것은 반대의 공정을 사용할 경우 소스/드레인 전극 형성시 이루어지는 채널층에의 영향을 배제하기 위한 것이다. 반면, Bottom 게이트 top contact 구조의 경우 소스/드레인 전극 형성 공정이 active layer 상층부에 나쁜 영향을 주게 되어 위에서 언급한 back channel 효과등을 유발함으로써 소자의 특성을 나쁘게 하는 원인이 될 수 있기 때문에 식각방지막등 비정질 실리콘 TFT에서 사용되던

공정을 응용한 시도가 이루어지고 있다.

산화물 TFT 특성에서 게이트 절연막의 선택도 큰 영향을 미치고 있다. 현재까지는 주로 전통적으로 가장 흔하게 볼 수 있는 실리콘 산화막이 널리 사용되고 있으며 실리콘 질화막도 많이 사용되고 있다. 이 이외에도  $Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  등 여러 산화막이 시도되고 있는데 절연막에 따라 소자의 Hysteresis와 이동도 등에 큰 영향이 있지만, 아직까지 어떤 절연막이 가장 좋은 특성을 보일 것인지는 확실하지 않으며, 앞으로 많은 연구가 필요한 분야라고 생각된다.

현재까지 산화물 TFT를 제조하는 공정은 주로 습식 식각이 사용되고 있다. 습식 식각은 건식식각 공정에 비하여 장치가 간단하며 경우에 따라서 매우 높은 선택비를 가질 수 있기 때문에 많이 이용되어 왔다. 그런데 산화물 TFT의 경우 구성층을 모두 산화물 계층으로 구성하면 선택비가 얻어지지 않는 경우도 있기 때문에 건식 식각도 연구가 진행되고 있다.

채널층에 사용되고 있는 산화물의 경우 산소의 함유량에 따라 intrinsic 결함의 양이 변한다. 따라서 대부분 산화물 TFT의 경우 공정중, 혹은 공정 마지막에 고온에서의 열처리 공정을 거치게 된다. 이러한 열처리 공정을 통하여 계면의 상태를 개선할 뿐만 아니라 채널층 자체의 결함을 제거하는 것도 가능하다.<sup>[15]</sup> 이때의 열처리 공정온도는 200~400°C 정도를 사용하고 있는데, 값싼 기관의 사용을 가능하게 하기 위해서는 후속 열처리 없이 TFT 특성이 나오도록 공정을 확보하거나 열처리 공정온도를 낮추는 것이 필요하다고 하겠다.

### 3. 전기적 특성

현재 산화물 TFT에 사용되고 있는 산화물의 경우 대부분 조성의 변화에 따라 전기적 특성이 절연체에서 전도체까지 변화가 가능한 것들이 많다. 예를 들어 ZnO의 경우 별도의 도핑없이  $10^{10}$ 에서  $10^{-4}$ 의 비저항값( $\Omega \text{cm}^{-1}$ )을 보여줄 수 있다. 이러한 특성은 산화물이 가지는 큰 밴드갭과 산소 결함 혹은 금속 결함 같은 intrinsic한 결함에 의한 intrinsic한 도핑의 결과이다. 즉, 큰 산화물이 가지는 큰 밴드갭 때문에 캐리어를 만들어 내는 결함이 없는 상태에서는 매우 작은 전기 전도도를 보이게 된다. 그러나 intrinsic한 결함이 캐리어를 만들어 내는 결함인 경우에 이러한 결함의 양을 늘림으로써 큰 전기전도도를 가지게 할 수도 있다. 따라서 산화물 TFT에서는 불순물의 통제뿐만 아니라 자체적인 결함을 최소화하기 위한 공정의 최적화가 필수적이라 할 수 있다.

단결정 상태에서 산화물의 이동도는  $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  정도로 알려져 있다(ZnO).<sup>[16]</sup> 실제로 TFT에 이용되고 있는 박막은 다결정 형태이거나 비정질 형태이다. 따라서 산화물 TFT에서 측정되는 이동도의 값은 이보다 훨씬 작은  $1\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  사이의 값을 가지고 있다. 아직까지는 실리콘 반도체에서 사용하고 있는 실리콘 반도체와 실리콘 산화막 사이의 계면 같은 좋은 계면 특성을 보이는 조합이 알려져

있지 않기 때문에 현재 얻어지고 있는 이동도의 값이 산화물 채널층이 가질 수 있는 최대의 값은 아닐 가능성이 많으며 실제로 게이트 절연막에 따라서 같은 채널층을 사용하더라도 다른 이동도를 보여주고 있는 경우가 있다. 현재 AMOLED 패널 연구에 주로 사용되고 있는 IGZO의 경우에는  $10\sim 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>[13]</sup>

누설전류의 경우 산화물 채널층이 가지는 큰 밴드갭을 고려하면 실리콘 반도체의 경우보다 더 작을 가능성이 많다고 예상할 수 있다. 그런데 실제의 경우 intrinsic 캐리어를 가지는 경우에서 TFT를 제조하게 되므로 채널층 자체의 누설 전류가 존재하며 이에 따른 누설 전류 특성은 pA이하로서 비정질 실리콘 TFT의 경우와 거의 같은 수준을 보이고 있다. 채널층이 누설 전류를 가지고 있기 때문에 채널층의 모양에 따라 소자 특성이 달라지는 현상이 관측되었으며 이런 현상은 effective 채널층을 벗어나서 흐르는 누설전류를 가정하여 설명이 가능하다.<sup>[17]</sup>

산화물 TFT의 swing 특성은 실리콘 계열의 TFT보다 작은 값인  $0.2\sim 0.5 \text{ V/dec}$  사이의 값을 보이고 있다. 특히 canon사의 경우 스퍼터링 방법을 사용하여 제조한 실리콘 산화막을 이용하여 IGZO TFT에서  $0.2 \text{ V/dec}$ 의 값을 보임을 발표했다.<sup>[18]</sup>

산화물 반도체는 밴드갭이 크기 때문에 ( $>3 \text{ eV}$ ) 가시광선 영역에서 투명한 특성을 보인다. 그렇지만 강한 가시광선이나 UV 영역에서는 빛에 반응하여 광전류 특성을 보인다.<sup>[19]</sup> 실제로 일부 산화물 반도체에서는 잔류광특성(PPC; Persistent Photo Current)을 보이는 것이 보고 되기도 하였다.<sup>[20]</sup> 이러한 특성은 밴드갭내에 존재하는 결함과 빛과의 상호작용에 의해 일어나는 현상으로 추정되며 향후 산화물 TFT의 투명 특성을 이용하여 소자를 제조하는 경우에 주의가 기울여야 할 것이다.

산업화를 위하여 가장 주목 받고 있는 특성이 전기적 안정성이다. 특히, 비정질 실리콘 TFT의 경우 바이어스에 의한 준안정성 때문에 AMOLED로의 응용이 쉽게 이루어지지 못하고 있는 상황이기 때문에 AMOLED로의 응용을 위해서는 전기적인 바이어스에 대한 안정성이 반드시 필요한 상황이다. 아직까지 많은 보고가 이루어지지 않았지만, 상대적으로 비정질 실리콘 TFT에 비해서는 우수한 바이어스 안정성을 보이고 있으며, 특히 바이어스가 제거되면 원상으로 회복되는 특성이 보고<sup>[17]</sup>되고 있기 때문에 안정성이 확보될 가능성이 높다고 보여진다.

### 4. 산화물 TFT의 장점

이상에서 살펴본 특성을 통해 산화물 TFT의 장점을 정리하면 다음과 같다.

산화물 TFT의 경우 투명한 채널층이 사용되고 있으며 일반적으로 게이트 절연막도 투명한 물질이 사용되고 있기 때문에 게이트와 소스/드레인 등 전극에 투명한 물질을 사용할 경우 투명한 TFT의 구현이 가능하다. 이러한 특성은 디스플레이 픽셀 구동소자로 주로 활용되고 있는 산화물

[표 1] 산화물 반도체 TFT와 다른 반도체 TFT의 비교표

	LTPS TFT	a-SiTFT	OTFT	Oxide TFT
Uniformity	△	○	○	○
Mobility(cm <sup>2</sup> /V.s)	50~150	<1	<1	1~80
Stability	◎	△	△	?(○)
Cost	△	○	◎	◎
Process Temp.	> 250°C	~ 250°C	RT~ 250°C	RT~ 250°C
Substrate	Glass, Metal	Glass, Metal, Plastic	Glass, Metal, Plastic	Glass, Metal, Plastic

TFT의 경우 개구율 확보나 소자 구성 측면에서 장점을 가지게 된다.

산화물 TFT의 소자 구조는 지금까지 알려진 TFT중 가장 단순한 형태를 가지고 있다. 따라서 제조 공정이 단순하며, 채널층인 산화물 반도체 박막을 제외하고는 이미 양산공정에 적용된 재료들로 구성되어 있기 때문에 양산 공정의 개발도 비교적 쉽게 이루어질 것으로 예측된다.

이러한 단순한 구조에도 불구하고 산화물 반도체의 전기적 특성은 상당히 우수한 편이다. 다결정 실리콘 TFT와 비교하여 전기이동도가 작은 편이며 아직 바이어스 안정성이 확보되지 않은 상황이지만 AMOLED 픽셀 구동용으로는 부족함이 없는 특성을 보여주고 있다.

#### IV. 산화물 TFT의 이슈 및 향후 연구 방향

앞장에서 살펴본 바와 같이 산화물 TFT의 제작 공정은 단순한 편이지만, 아직까지 표준 공정이라고 부를 만한 공정이 개발되지 못하고 있다. ZnO와 같은 다결정 박막 형태를 가지는 산화물의 경우에는 고온 증착 공정 혹은 고온 열처리 공정이, IGZO와 같은 비정질 형태를 가지는 산화물의 경우에는 PLD 공정이 좋은 특성을 보여주고는 있지만, 두 공정 모두 디스플레이등 산업 분야에 직접 응용될 수는 없는 공정이고, 실제로 널리 쓰이고 있는 스퍼터링 공정의 경우에 아직까지는 많은 공정변수들이 존재하며 특히 산소 분압의 영향이 큰 것으로 알려져 있지만, 증착 시스템에 따라 혹은 스퍼터링 타겟 물질에 따라 소자 특성 경향이 다르게 나타난다. 이렇듯 아직까지는 산화물 TFT를 구성하고 있는 표준 물질이나 공정이 확립되어 있지 않기 때문에 각 연구팀에서 발표하는 특성이 산화물 TFT의 고유한 특성인지 혹은 특정 공정에 기인한 것인지 분명하지 않은 문제가 있다. 좀더 많은 연구가 이루어져서 가장 우수한 특성을 보이는 공정이 확립되면 산화물 TFT가 가지는 고유한 특성들이 확실하게 드러날 것으로 예상된다. 이때 산업에의 응용을 고려하여 공정 균일도, 재현성이 확보될 수 있는 공정이 선정되어야 한다.

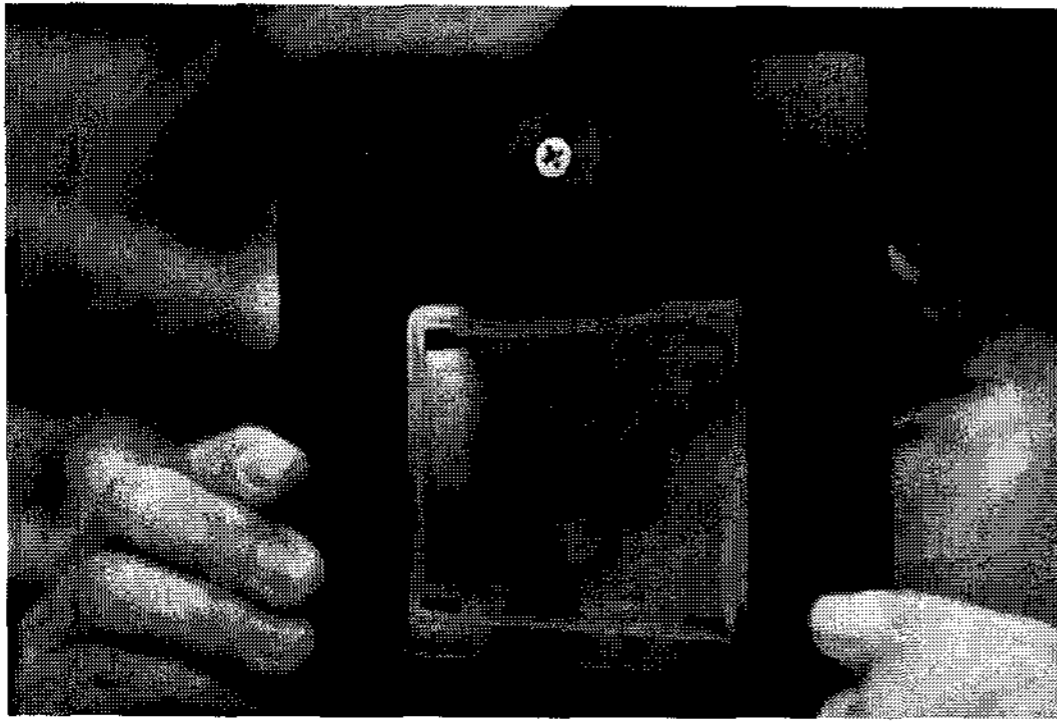
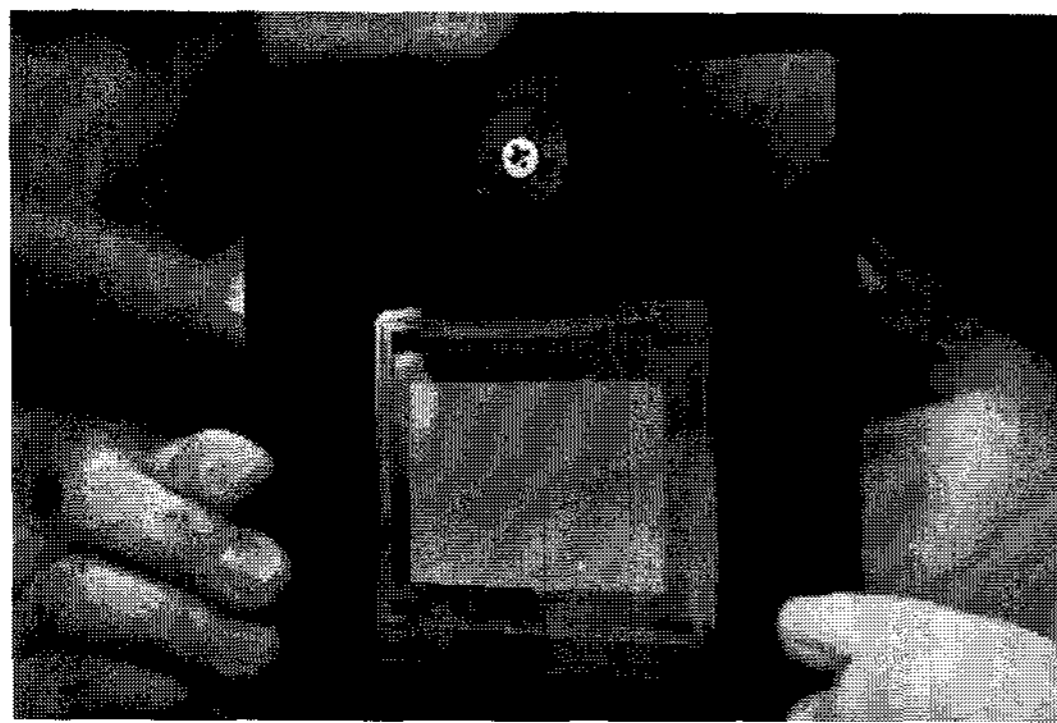
현재까지 알려진 투명 산화물 반도체중에서 p형 특성을 보이면서 TFT를 제조할 정도의 안정성과 공정 적합성을 보인 물질은 발견되지 않았다. P형 TFT의 제작은 AMOLED 픽셀을 구동하기 위한 소자로서의 역할과 IC등 집적 회로를

구성하기 위한 소자로서 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다. N형으로 주로 사용되고 있는 ZnO 계열 산화물의 경우, intrinsic한 결함들이 주로 n형을 유발하기 때문에 p형을 만들기 위해서는 결함이 매우 적은 ZnO 박막을 제조하고 또한 p형을 유발할 수 있는 불순물을 첨가해야 한다. 그런데 결함이 적은 ZnO 박막을 제조하는 것도 어려울 뿐더러 그러한 상태를 유지하면서 p형을 유발할 수 있는 불순물을 첨가하는 것은 더욱 어렵다. 현재는 Cu 계열 산화물을 이용하는 방법이 많이 연구되고 있으나 이 경우 밴드갭이 좁기 때문에 투명한 특성을 보이지 않는다. 그렇기 때문에 IC를 제작하는 경우에는 p형 특성을 보이는 유기 혹은 칼코제나이드 반도체 TFT를 사용하는 하이브리드 형태의 소자제작도 제안되고 있다. 투명하면서 p형 특성을 보이는 산화물 반도체 TFT가 개발될 경우 많은 응용분야가 있을 것으로 예상되고 있다. 투명 p형 산화물 반도체의 경우 TFT 뿐만 아니라 LED, 태양전지등에서 쓰임새가 많기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다.

투명한 소자로서의 응용을 생각하면 빛에 대한 안정성은 반드시 확보해야 할 특성이다. 현재까지의 연구 결과를 보면 약한 빛에는 투명 산화물 TFT가 영향을 받지 않지만 강한 태양광(1-sun 수준)에 대해서는 변화가 있는 것으로 알려져 있다. 이 특성중 밴드갭 이하의 빛에 의한 변화를 줄이려면 밴드갭내의 에너지 준위들의 양을 줄여야 한다. 그러기 위해서는 반도체 박막내 결함의 양을 줄여야 할 것이다. 그리고 밴드갭 주변부(주로 UV 이상)의 빛에 의한 변화를 줄이기 위해서는 밴드갭을 키우는(예를 들어 ZnO에 Mg를 추가하는 경우) 방법을 사용할 수 있다. 이러한 물질 특성 개선 방법 이외에도 산화물 반도체층의 두께를 낮추어 빛에 의한 영향을 줄이거나 소자 보호막에 가시광선 이외의 빛을 차단할 수 있는 보호막을 삽입하는 방법을 생각해 볼 수 있을 것이다. 아직까지는 이러한 특성을 평가하기 위한 표준 방법도 개발되지 않은 상황이다.

TFT를 실제 소자에 적용하기 위해서는 온도에 따른 특성 변화 평가도 이루어져야 한다. 일반적으로 온도에 따른 특성은 Conduction이 이루어지는 에너지 준위와 페르미 에너지 준위와의 차이에 대한 지수함수꼴로 나타나게 된다. 즉 그 차이가 클수록 온도에 대해 민감한 특성을 지닌다고 할 수 있다. 산화물 반도체의 경우 Si 반도체에 비하여 상대적으로 에너지갭이 크기 때문에 Conduction이 이루어지는 에너지 준위(주로 Conduction Band Edge)와 페르미 에너지 준위와의 차이는 클 가능성이 많다. 따라서 온도에 대해서도 변화가 클 것으로 예상할 수 있다. 이러한 차이에 대한 구체적인 평가와 이를 극복하기 위한 설계방법이 개발되어야 할 것이다.

안정성에 대한 문제는 새롭게 개발되는 TFT 소자에 있어 언제나 요구되고 있는 항목이다. 산화물 TFT의 경우 초기 응용제품이 AMOLED로 예상되고 있으므로 전류가 계속 흐르는 상황에서도 안정한 특성을 보여야 한다. 만약 LCD나 e-paper에 쓰이기 위해서는 전압에 대한 안정성만 확보되면 된다. 현재까지 알려진 특성을 보면 현재 LCD나 e-paper에 쓰이고 있는 비정질 실리콘 TFT에 비하면 우수

[그림 11a] 투명 디스플레이 Off 상태<sup>15)</sup>[그림 11b] 투명 디스플레이 On 상태<sup>15)</sup>

한 안정성을 가진 것으로 알려져 있으나 AMOLED에 쓰이고 있는 다결정 실리콘 TFT에 비해서는 안정성이 나쁜 것으로 알려졌다. 안정성에 가장 큰 영향을 주는 요인은 활성층과 절연막층사이의 계면인 것으로 알려져 있다. 특히 절연막층으로의 전하 트래핑을 최소화 하기 위해서 산화물 반도체와의 계면에 형성되는 결함이 적은 절연막에 대한 개발이 절실하게 필요하다.

이밖에도 낮은 저항을 갖는 투명 전극은 조명, 디스플레이, 태양전지등 여러 분야에서 활용도가 높기 때문에 많은 연구가 진행되고 있는데, 특히 산화물 TFT의 투명성을 활용한 소자를 만드는 경우 반드시 필요한 기술이다. 투명 전극에 대한 기술은 최근 In 원소에 대한 품귀현상이 벌어지면서 In을 배제한 투명전극을 만드는 쪽으로 많은 연구가 일어나고 있다. 산화물 TFT의 경우 금속을 S/D 전극으로 사용하는 것도 가능하지만, 산화물 전도체를 사용하는 경우도 많고 또한 투명 TFT로의 응용을 위해서는 반드시 산화물 전도체를 사용하여야 한다. 이 경우 현재까지의 기술로는 금속(AI)에 비해 50배정도 저항이 크기 때문에 접촉을 위한 전극으로는 사용이 가능하지만 배선용 전극으로는 사용이 불가능하다. 이 때문에 투명 TFT를 이용하여 투명 디스플레이 패널을 제조할 경우 투명전극의 저항에 따라 제작이 가능한 패널의 크기가 정해지게 된다. 2인치급 이상의 패널을 제작하기 위해서는 Cr 정도의 저항을 가지는 투명전극의 개발이 필수적이다.

## V. 결 론

산화물 TFT는 짧은 개발 역사를 가지고 있지만, 최근의 발전속도는 매우 빠르다. 앞장에서 살펴본 바와 같이 지금까지 축적된 여러 TFT에 적용된 기술을 활용하여 급속한 기술 개발이 가능했다고 할 수 있다. 또한 산업적으로 기존의 실리콘 TFT가 충족시켜주지 못하는 응용분야가 많이 부각되기 때문에 더욱 더 많은 주목을 받고 있다. 이러한 과정에서 현재 산화물 TFT가 보여주고 있는 특성은 기존의 TFT를 일부 분야에서는 대체할만한 정도의 수준까지 이르렀다. 그러나 안정성이나 양산성 등 검증되지 못한 특성들이 있고, 산화물에서 일어나는 물리현상에 대한 체계적인 규명 역시 이루어지지 않은 상황이다.

산화물 TFT를 필요로 하는 시장이 곧 열릴 것으로 예상되기 때문에 산화물 TFT가 산업에 응용되기 위해서는 특성 안정화와 같은 실제적인 문제와 물리 현상 규명 같은 과학적인 문제가 동시에 해결되어야 한다.

새로운 종류의 TFT의 등장은 현재의 디스플레이 산업에 커다란 파급효과를 줄 뿐만 아니라 산화물 반도체가 가지는 특징 때문에 여타분야의 산업에도 미치는 파장이 클 것으로 예상된다. 이러한 의미에서 현재 세계적으로 디스플레이 산업을 이끌어 가고 있는 우리나라의 역할이 중요하다.

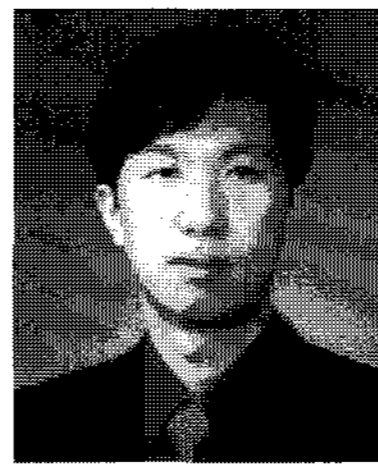
우리나라가 비록 원천 기술에서는 부족한 점이 많지만, 응용기술분야에서는 세계적으로 가장 앞서있는 상황이기 때문에 산학연이 힘을 모은다면 새롭게 펼쳐질 산화물 반도체 분야에서도 기술을 개척해 나갈 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [1] K.-O. Grosse-Holz, J.P.M. Cillessen, M.W.J. Prins, P.W.M. Bolm, R.W. Wolf and R. Waser, MRS (1995).
- [2] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, Nature Vol.432 (2004) 488.
- [3] M.-C. Sung, H.-N. Lee, C.N. Kim, S.K. Kang, D. Y. Kim, S.-J. Kim, S.K. Kim, S.-K. Kim, H.-G. Kim and S.-t. Kim, IMID (2007) 134.
- [4] J.K. Jeong, M. Kim, J.H. Jeong, H.J. Lee, T.K. Ahn, H.S. Shin, K.Y. Kang, H. Seo, J.S. Park, H. Yang, H.J. Chung, Y.G. Mo, and H.D. Kim, IMID (2007) 145.
- [5] S.-H. Ko Park, C.-S. Hwang, C. Byun, M. Ryu, J.-I. Lee, H.Y. Chu, and Kyoung Ik Cho, IMID (2007) 1249.
- [6] J.Y. Kwon, K.S. Son, J.S. Jung, T.S. Kim, M.K. Ryu, K.B. Park, J.W. Kim, Y.G. Lee, C.J. Kim, S.

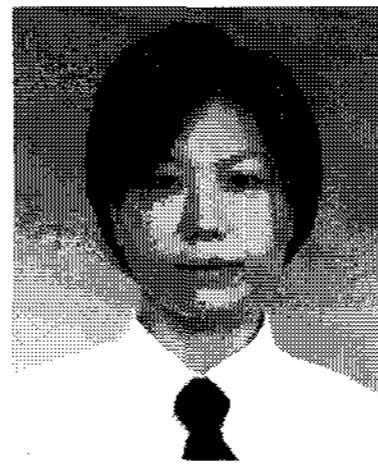
- I. Kim, Y. S. Park, S. Y. Lee and J. M. Kim, IMID (2007) 141.
- [7] R. L. Hoffman, B. J. Norris and J. F. Wager, Appl. Phys. Lett. Vol.82 (2003) 733.
- [8] J. Nishii, F. M. Hossain, S. Takagi, T. Aita, K. Saikusa, Y. Ohmaki, I. Ohkubo, S. Kishimoto, A. Ohtomo, T. Fukumura, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Koinuma, H. Ohno and M. Kawasaki, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42 (2003) L347.
- [9] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, Science Vol.300 (2003) 1269.
- [10] T. Hirao, M. Furuta, H. Furuta, T. Matsuda, T. Hiramatsu, H. Hokari and M. Yoshida, SID (2006), 18.
- [11] M. Ito, e-MRS (2007).
- [12] C.-S. Hwang, S.-H. Ko Park and H. Y. Chu, IDW (2005) 1149.
- [13] H. N. Lee, J. W. Kyung, S. K. Kang, D. Y. Kim, M. C. Sung, S. J. Kim, C. N. Kim, H. G. Kim and S. T. Kim, IDW (2006) 663.
- [14] M. Ofuji, K. Abe, N. Kaji, R. Hayashi, M. Sano, H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, H. Hosono, ECS Transactions, 3 (8) (2006) 293.
- [15] K. Nomura, T. Kamiya, H. Ohta, T. Uruga, M. Hirano and H. Hosono, Phys. Rev. B 75, (2007) 035212.
- [16] D. C. Look, D. C. Reynolds, J. R. Sizelove, R. L. Jones, C. W. Litton, G. Cantwell and W. C. Harsch, Solid Stat. Comm. Vol.105 (1998) 399.
- [17] H.-N. Lee, J. Kyung, S. K. Kang, D. Y. Kim, M.-C. Sung, S.-J. Kim, C. N. Kim, H. G. Kim and Sung-tae Kim, SID (2007) 1826.
- [18] H. Kumomi, e-MRS (2007).
- [19] H. S. Bae and S. Im, Thin Soild Films vol 469-470 (2004) 75.
- [20] S. Lany and A. Zunger, Phys. Rev. B vol 72 (2005) 035215.

## 저자 소개



### 황치선

1987~1991 : 서울대학교 물리학과 학사, 1991~1993 : 한국과학기술원 물리학과 석사, 1993~1996 : 한국과학기술원 물리학과 박사, 1996~2000 : 현대반도체 메모리 연구소, 2000~현재 : 전자통신연구원 선임연구원



### 박상희

1983. 3~1987. 2 : 서울대학교 화학교육과 학사, 1987. 3~1989. 2 : 서울대학교 화학교육과 석사(무기금속화학), 1992. 9~1997. 12 : University of Pittsburgh; Chemistry(유기금속화학) 박사, 1998. 5~1999. 6 : 한국전자통신연구원 Postdoctorial, 1999. 07~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원