

Trend & Technology 1

산화물 박막 트랜지스터 기술동향

글 고려대학교 전자전기공학과 김중우, 서한, 장성필, 주병권

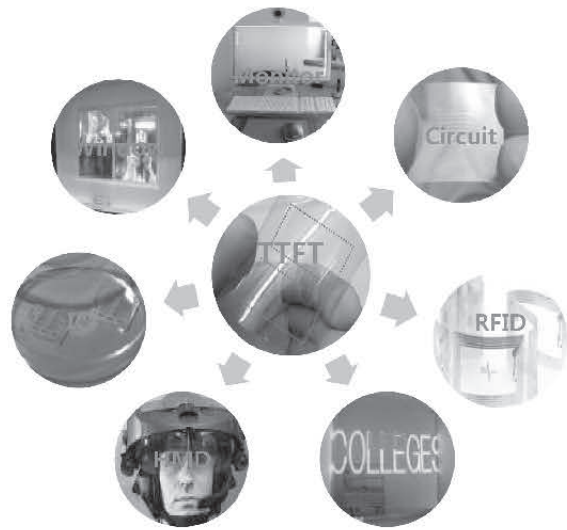


1. 산화물 기반 투명 Display

과거 톰 크루즈가 출연하여 화제가 된 Minority Report나 Red Planet 같은 공상과학 영화에서나 보아왔던 투명한 디스플레이가 최근 각종 전시회에 등장하며 눈길을 끌고 있다. 이들 디스플레이는 기존의 실리콘 기반의 반도체를 이용한 것이 아니라 투명 산화물 반도체 TFT(Transparent Oxide Semiconductor Thin-Film Transistor) array를 적용하여 제작한 것들이다. 이들 산화물 기반 소자의 특징은 가시광 영역에서 높은 투과도를 보이며, 기존의 비정질 실리콘기반의 소자에 비해서 높은 이동도를 나타낸다. 이러한 이점을 활용하여 투명 산화물 반도체는 자동차 방풍유리나 창문 등을 디스플레이화면으로 이용한다거나, HMD(Head Mounted Display), e-paper 등에 사용하여 앞서 영화에서나 보아왔던

꿈의 디스플레이의 실현을 현실화 하고 있다. 이 외에도 현재 많이 사용되고 있는 LCD(Liquid Crystal Display)나 PDP(Plasma Display Panel) 등에도 사용이 가능하다. 또한 낮은 공정온도에서도 제작이 가능하기 때문에 구부릴 수 있는 유연한 Display로의 응용도 가능하여 그 잠재성은 무한하다.

투명 산화물 반도체 기술은 기존의 Si기반의 소자와 비교해 보았을 때 여러 가지 이점을 가지고 있다. 첫 번째 이점으로 광학적 측면에서 산화물 반도체는 투명한 박막을 형성할 수 있다. 산화물반도체와 비교되는 기존의 Si나 GaAs 같은 반도체는 각각 1.2 eV와 1.43 eV의 밴드갭(Band Gap)을 가지고



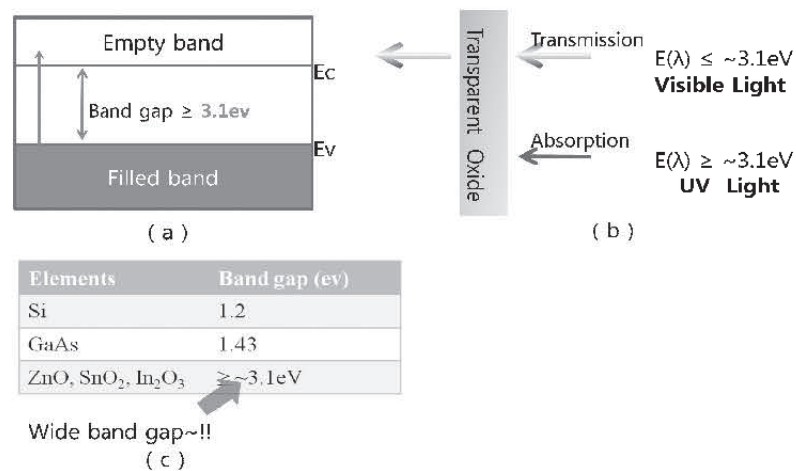
〈그림 1〉 투명 산화물 반도체를 응용한 각종 Display 및 응용 기기

있는데 밴드갭 이상의 에너지를 가지고 있는 가시광이 비춰지면 가전자대(Vallence Band)의 전자가 전도대(Conduction Band)로 여기 되는 현상으로 빛 에너지가 손실되고, 이로 인해 투과되는 빛 에너지가 줄어들게 된다. 이에 비해 ZnO나 Ga_2O_3 , In_2O_3 , SnO_2 같은 산화물반도체는 약 3.1 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가지고 있어 가시광의

흡수가 일어나지 않고 투과되어 투명한 Display소자로 이용이 가능하다. 둘째로 전기, 전자적 측면에서 보면 산화물 반도체는 높은 운반자 이동도(High carrier mobility, 1~100 cm^2/Vs)를 가지고 있어 전기적 성능 또한 우수하다는 특징을 가지고 있다.

세 번째 이점으로 산화물 기반의 반도체는 상온에서도 다결정(Poly-crystalline)구조 및 비정질(Amorphous)구조를 가지고 있어 별도의 열처리(Annealing) 과정을 거치지 않고도 좋은 특성의 박막 트랜지스터 제작이 가능하다. 물론 〈표 1〉에서 보이는 것과 같이 비정질 실리콘 기반의 a-Si TFT가 현재는 디스플레이의 스위칭 소자로써 사용되고 있지만, 산화물 박막트랜지스터 보다 전자 이동도(Mobility) 측면이 매우 떨어지는 특성을 가지고 있

기 때문에 높은 성능이 요구되는 디스플레이 장치에 적용하는 데 있어서는 제약이 있다. 비정질 실리콘의 이동도를 향상시키기 위한 방법으로써, 레이저에 의한 다결정 실리콘(ELA p-Si, Excimer Laser Annealed polycrystalline Si)과 열처리에 의한 다결정 실리콘(Non-laser polycrystalline Si)을 이용할 수 있지만, 상대적으로 높은 공정온도와, 박막의 불균일성으로 인하여 산화물반



〈그림 2〉 (a) 산화물 재료의 밴드갭 그림 (b) 빛의 파장에 따른 투명 산화물의 투과, 흡수특성
(c) 일반적으로 사용되는 반도체 재료와의 밴드갭 비교

〈표 1〉 Si 기반의 기술과 Oxide 기반 기술의 비교

ITEM		ELA p-Si	Non-laser p-Si TFT	μ -Si	a-Si TFT	Oxide TFT
Mobility (cm ² /vs)		50~200	20~100	1~20	0.5~1	~100
TFT type		PMOS, CMOS	PMOS, CMOS	NMOS	NMOS	NMOS
TFT uniformity		Worse	Medium	Better	Better	Better
Process Step		PMOS : 5~6 CMOS : 9~10	PMOS : 5~6 CMOS : 9~10	5~6	4~5	4~5
Equipment investment		High	Medium	Low	Low	Low
Compatibility with a-Si TFT line		Not	Medium	OK	OK	OK
C O S T	TFT	High	Medium	Low	Low	Low
	Module	Low (Integrated Driver)	Low (Integrated Driver)	High (non-integrated)	High (non-integrated)	Medium (non-integrated)
	Total	Profitable (small size panel)	Medium	High (Large size panel)	High (Large size panel)	Profitable (Large size panel)
Current Stability		Stable	Stable	Stable	Unstable	???

도체에 비해서 다소 취약한 특성을 나타낸다. 이것 이외에도 그 재료자체의 가격이 저렴하다는 점과 기존의 Si 기반의 생산라인을 그대로 사용할 수 있다는 측면의 이점도 가지고 있어 성능, 가격, 공정, 투과성 등 여러 가지 측면에서 발전이 기대된다. 물론 이렇게 많은 장점을 가진 산화물 반도체도 실리콘 기반의 박막 트랜지스터와는 달리 p-type 반도체 제작에 어려움이 있어서 그 응용에 제약이 따른다는 단점을 가지고 있으며, 이는 아직까지도 풀어야 할 과제로 남겨지고 있다.

2. 원천기술 확보를 위한 재료기술 개발

현재까지 발표된 산화물 반도체의 동향을 살펴보면 2003년 Masuda et al., Hoffman et al., Carcia et al. 등 3개의 그룹에서 발표한 산화아연(ZnO) 기반의 박막 트랜지스터가 산화물 반도체 기반의 박막 트랜지스터의 시작이라고 볼 수 있으며 일본의 동경공대(TIT, Tokyo Institute of Technology)의 히데오 호소노(Hideo Hosono) 그룹에서 2003년 발표한 단결정 산화물 박막트랜지스터(sc-IGZO TFT)와 2004년 발표한 비정질 산화물 박막 트랜지스터(a-IGZO TFT) 및 미국 오레곤 주립대학교의 John. F. Wager 그룹의 Zinc Tin Oxide(ZTO), Indium Zinc Oxide(IZO) 같은 비정질 산화물반도체의 발견 등 다양한 관점에서 연구가 이루어졌다.

○ 2성분계 산화물 반도체

2성분계 산화물 반도체는 2가지 원소로 이루어진 산화물을 기반으로 하는 반도체로 ZnO, SnO₂, In₂O₃, Ga₂O₃ 등이 대표적이다. 이들 2성분계 반도체는 기본적으로 n-type의 반도체 특성을 가지고 있는데 이것은 재료 자체에 생성되는 산소자리 결핍 결함(Oxygen Vacancy)이나 금속원소의 침입형 결함(Metal interstitial defect)으로 인한 자유전자(Free electron)의 생성에 기인한다. 이러한 결함 조절 이외에도 이종원소의 도핑(Doping)을 통한 자유전자 생성의 방법도 존재하며 이런 특성을 이용해 산화물 반도체의 전도성을 조절하게 된다.

초창기에 발표된 산화아연 기반의 TFT는 많은 문제점을 가지고 있었는데 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 첫 번째 문제는 너무 높은 운반자 농도로 인한 소자제어성의 감소문제였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 박막의 Zinc(Zn) 위치에 1족의 원소를 도핑 하거나 Oxygen(O) 위치에 5족의 원소를 도핑하여 운반자 농도를 감소시키는 시도 및 얇은 channel 두께의 TFT를 제작하여 결함(Defect)의 절대적인 수치를 낮게 해 채널층을 형성하는 시도 등이 그것이다. 이러한 결과들을 통해 ZnO 기반의 TFT가 투명 TFT로서 충분히 응용이 가능하다는 것을 입증하였으며, 유리 기판에 TFT를 구현함으로써 투명 Display 응용으로써의 특성 또한 입증하였다.



〈표 2〉 산화물 반도체 소자로 사용 가능한 물질

11	12	III 13	IV 14	V 15	
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	4
47 Ag 107.87	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	5
79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	6

○ 다성분계 산화물 반도체

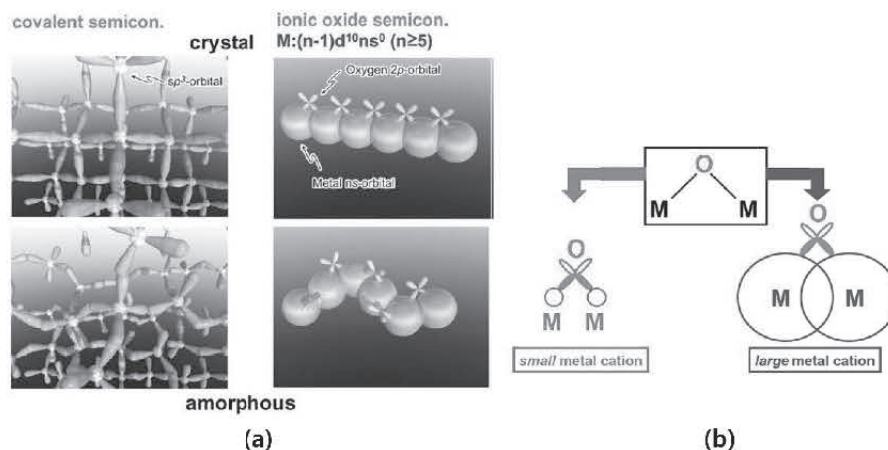
위에서 언급한 2성분계 산화물 반도체의 경우 채널로써 충분히 사용이 가능하지만, 그에 따라 나타나는 결함들로 인해 소자의 특성이 불안정하거나, 외부환경과 반응하는 문제로 인하여, 다성분계 산화물 반도체에 대한 연구가 시작되었다. 여기에는 3성분계와 4성분계 반도체가 주류를 이루는데, 주로 사용되는 원소는 Sn, In, Ga 등이 있다. 특히 SnO_2 와 In_2O_3 는 산소의 2p 궤도보다 큰 금속의 s 궤도에 의한 전자전도에 의하여 비정질임에도 불구하고, 높은 전자 이동도를 갖게 되는 특징을 나타낸다. 비정질 산화물 반도체(Amorphous Oxide Semiconductor)로서 산화물 투명 트랜지스터에의 응용이 가능한 반도체 원소는 〈표 2〉에 나타났다. 일반적으로 특성이 우수하고 과거부

터 널리 사용되어 왔지만 최근 환경문제 및 RoHS 등의 국제 협정 등으로 인해 사용이 제약된 Cd, Pb 등 빨간색 x표로 표시한 중금속 원소가 포함되어 있는 III-V족 반도체가 그것들이다. 〈표 2〉의 원소 중 금속 x표로 표시한 Ag와 Au 같은 희귀 금속은 그 가격으로 인해 사용이 쉽지 않은 단점을 가지고 있다. 이 외에도 최근 사용량 증대로 인한 가격상승을 겪고 있는 In이나 Ga도 그 사용량을 줄이려는 노력이 진행되고 있다. 그 외의 남은 원소들로 binary 조성을 조합해 보면 약 105종의 조합이 나오지만 실질적으로 사용 가능한 조성은 25개 정도에 불과하며 Indium Tin Oxide(InSnO), Gallium Indium Oxide(GaInO), Zinc indium Oxide(ZnInO), Zinc Tin Oxide(ZnSnO)와 4종원소로 이루어진 Indium Gallium Zinc Oxide(InGaZnO) 등이 대표적이다.

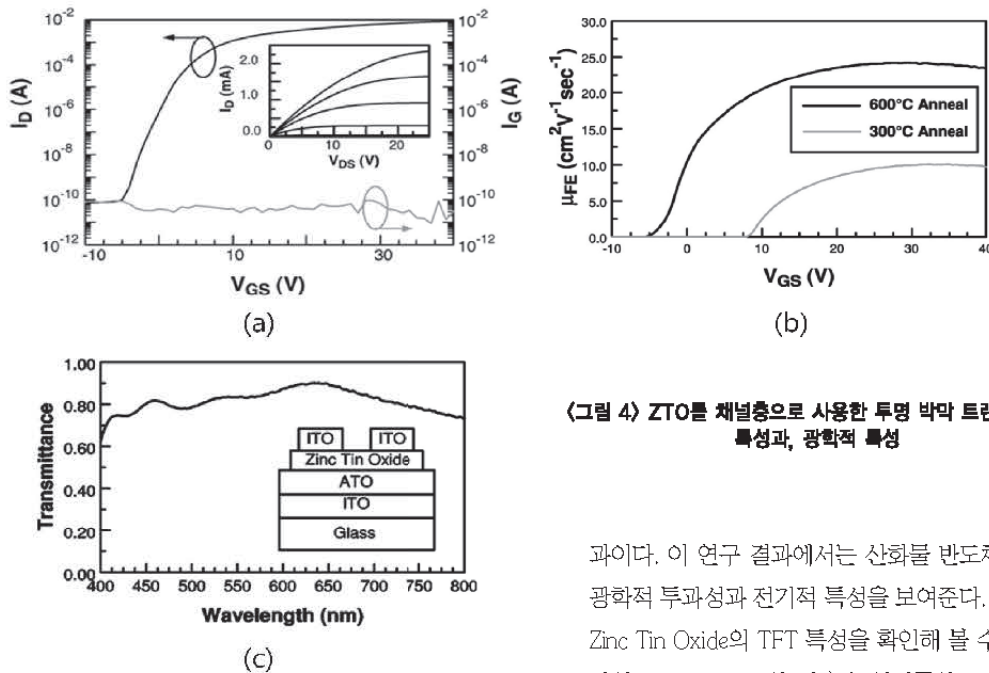
비정질 산화물 반도체는 일반 반도체와는 약간 다른 전기전도 방식을 취하고 있는데 이는 〈그림 3〉에 나타났다.

〈그림 3〉은 비정질 산화물 반도체의 전기전도 방식을 나타낸 모식도이다. 일반적인 공유 결합성 반도체(예: Si, Ge)의 경우 방향성을 갖는 sp^3 혼성궤도를 통한 밴드갭 전도 방식으로 전기전도가 일어나지만 비정질 산화물 반도체의 경우는 공유결합특성의 반도체와는 다르게 금속의 ns-orbital의 궤도 겹침($n \geq 4$, n은 궤도번호)과 s-궤

도의 전방향성에 의한 전자가동이 일어나게 된다. 일반적으로 금속의 ns 궤도의 크기를수록 겹치는 궤도의 영역이 넓어지고, 전자가 이동할 수 있는 확률이 증가하게 된다. 따라서 In이나 Sn 같은 중금속 원소가



〈그림 3〉 (a) 공유결합 반도체의 궤도결합구조와 비정질 산화물 반도체의 궤도결합구조
(b) 금속 음이온의 궤도반경 크기에 따른 궤도결합 구조



〈그림 4〉 ZTO를 채널층으로 사용한 투명 박막 트랜지스터의 특성과 광학적 특성

넓은 전자 반경으로 인해 비정질 산화물 반도체로 이용될 경우 뛰어난 전도특성을 보이게 된다. 이때 금속이온과 산소 이온의 결합은 원자 반경의 2배 가량 되는 넓은 원자 궤도에 의해 상쇄되기 때문에 큰 영향을 끼치지 않는다. 〈그림 4〉는 3가지 원소의 결합으로 이루어진 산화물 반도체 중 잘 알려진 Zinc Tin Oxide를 TFT의 채널층으로 사용한 연구 결

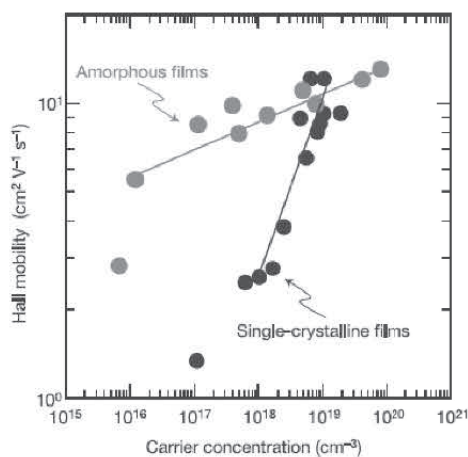
과이다. 이 연구 결과에서는 산화물 반도체의 특징인 높은 광학적 투과성과 전기적 특성을 보여준다. 그림을 살펴보면 Zinc Tin Oxide의 TFT 특성을 확인해 볼 수 있다. 약 10^8 이상의 On-Off ratio와 낮은 누설전류와 $10\sim30\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 의 이동도를 보여주는 이 소자는 화학적 안정성과 낮은 가격 등의 특성으로 차후에 Active matrix display 응용 등에 사용 될 가능성이 높다.

〈그림 5〉는 비정질 박막과 단결정 박막의 운반자 농도의 변화에 따른 이동도의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 단결정 박막의 이동도가 운반자 농도에 민감하게 변하는 반면 비정질 IGZO는 이동도의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

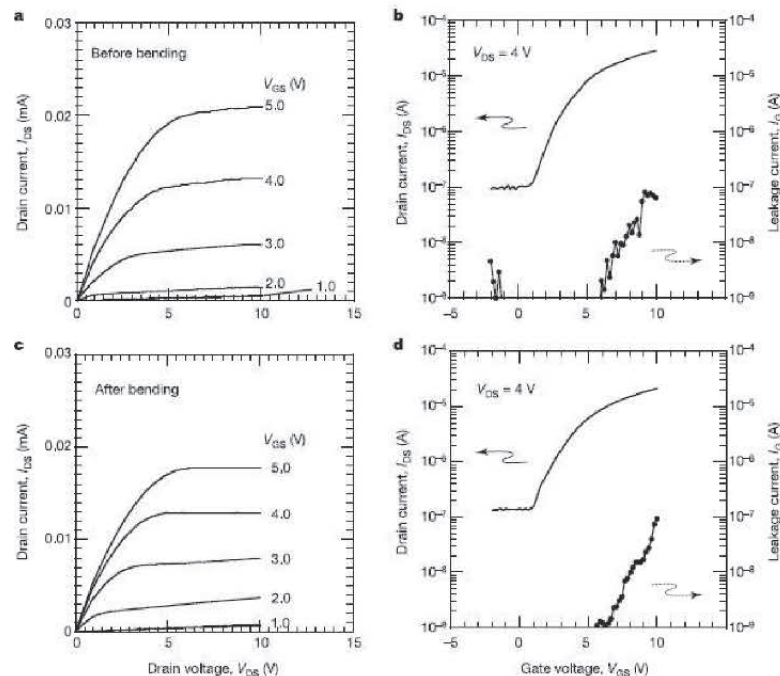
또한 상온공정이 가능하기 때문에, 플라스틱 기판 위에도 소자의 제작이 가능하며, 〈그림 6〉은 플라스틱 기판 위에 제작된 비정질 IGZO 박막 트랜지스터의 회어집에 따른 특성변화를 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 살펴보면 포화 mobility는 $8.3\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 이고 On-Off 전류비는 10^3 정도의 특성을 보이고 있다. 이러한 특성으로 인해 a-IGZO는 기판의 제약을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다.

3. 소자의 성능향상과 신뢰성 확보

2005년까지 진행된 다양한 산화물 채널에 대한 소자의 응



〈그림 5〉 비정질 IGZO 박막과 단결정 IGZO 박막의 운반자농도에 대한 전하이동도 특성



〈그림 6〉 플라스틱 기판 위에 제작된 비정질 IGZO TFT의 휘어짐에 따른 특성 그래프

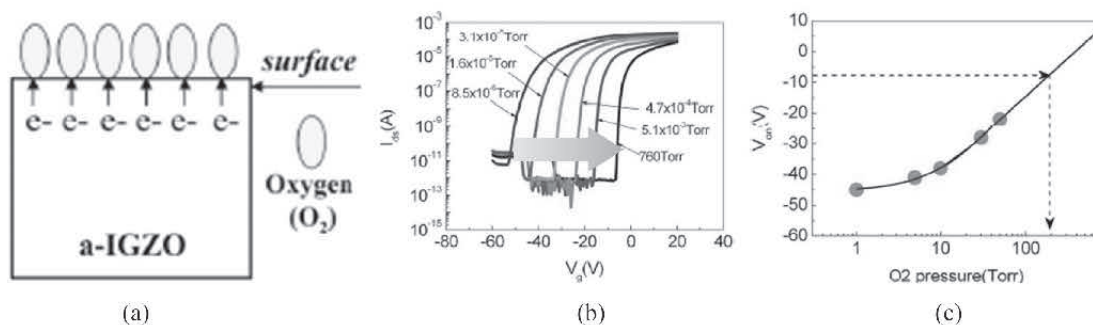
용가능성의 검증이 마무리 된 이후에, 많은 연구그룹들의 관심사는 저전압 구동과, 소자의 신뢰성 확보에 관심을 갖기 시작했다. 그에 따라 가장 먼저 수행된 연구는 채널이 외부로 드러났을 경우에, 외부환경과의 반응에 의한 소자 특성 변화의 원인을 확인하고, 그에 따른 보호층의 유무에 따른 소자의 안정성 측정, 그리고 채널의 결합상태에 의한 소자의 장시간 구동환경에서의 특성변화에 대한 연구들이 주를 이루었다. 그리고 여러 가지 응용분야에 대해서도 연구가 이루어졌다.

〈그림 7〉은 산화물 채널이 대기 중에서 산소와 반응할 경우의 소자의 특성변화를 나타낸다. 대기중의 산소는 산화물 채널의 산소결합을 갖는 금속 음이온과 결합하여, 자유전자를 속박하는 역할을 한다. 그에 따라 산화물 채널에서 갖게 되는 자유전자의 숫자는 줄어들게 되고, 특성 그래프는 점점 오른쪽으로 이동하게 되며, 그에 따라 동작전압 또한 높은 쪽으로 변화하게 되어진다. 또한 〈그림 8〉은 산화물 채널이 대기중의 수분과 반응했을 경우

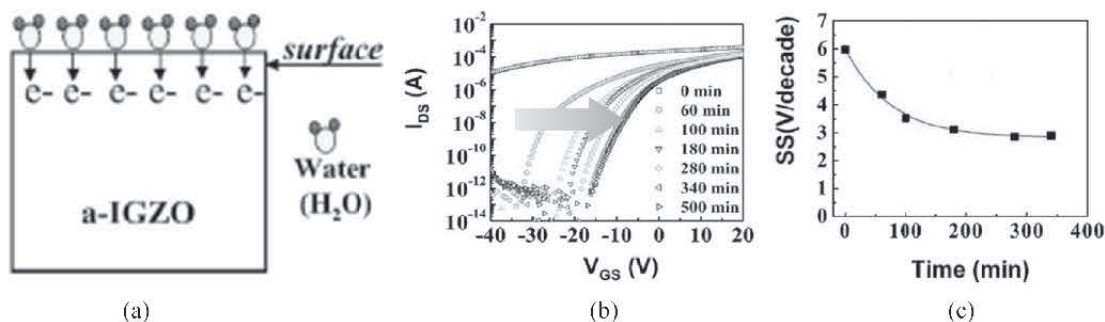
에 대한 연구결과이다.

〈그림 8〉에서 반응 매커니즘 자체는 산소의 경우와 유사하지만, 수분의 경우에는 2개의 수소원자에 의한 초과 운반자가 생성된다는 점에서 차이가 있다고 할 수 있다. 즉, 산소와 반응 할 경우 채널의 자유전자는 줄어들게 돼 동작전압이 높아지는 쪽으로 소자의 특성이 변화하게 되고, 수분의 경우에 오히려 반대로 초과 운반자가 생성돼 동작전압이 낮아지는 쪽으로 소자의 특성이 변화하게 될 것을 볼 수 있다. 소자의 동작환경이 항상 일정한 수분과 산소비율을 포함한다면 상관없겠지만, 동작환경이 항상 일정할 수는 없기 때문에 이러한 외부환경에 의한 소자특성 변화에 대한 대비책이 필요하며, 보호층에 대한 연구가 진행되게 된다.

〈그림 9〉는 여러 가지 보호층을 적용한 소자들의 장시간 동작환경에서의 동작전압의 변화를 나타냈다. 예상했던 바와 같이 보호층이 존재함으로써 소자의 특성이 변화하는 것을 상당히 억제할 수 있음을 볼 수 있다. 하지만 여



〈그림 7〉 산화물 채널이 대기중의 산소와 반응한 경우의 특성변화
(a) 개념도, (b) 산소 분압에 따른 소자의 특성변화, (c) 그에 따른 동작전압의 변화



〈그림 8〉 산화물 채널이 대기중의 수분과 반응한 경우의 특성변화
(a) 개념도, (b) 수분을 포함한 산화물 채널의 열처리 시간에 따른 소자의 특성변화, (c) 그에 따른 소자의 스위칭 특성 변화

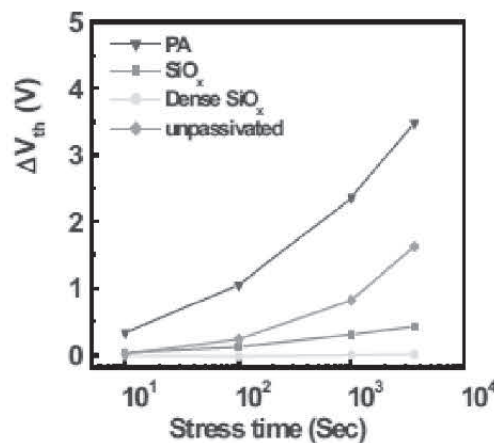
기서 주목할 만한 것은 유기물을 이용해 소자의 보호층을 형성한 경우 오히려 보호층이 존재하지 않는 경우의 소자 특성보다 특성 변화가 심한 것을 알 수 있다. 이는 유기물 보호층 내부에서 포함하고 있는 산소와 수분들에 의한 영향으로 보여진다.

소자의 신뢰성 확보와는 별도로 소자의 저전압 구동에 대한 연구 또한 진행되었는데, 특히 동작전압을 제어하기 위한 많은 연구가 진행됐다. 현재까지 연구가 진행된 동작전압 제어의 방법에는 크게 3가지 방법이 있다. 첫 번째는 채널층의 두께를 조절하는 방법이고, 두 번째는 두 개의 게이트 전극을 사용하여 제어하는 방법, 그리고 마지막은 전극의 구조를 변경하여 제어하는 방법이다. 이 세가지 방법의 장단점을 **표 3**에 나타냈다.

〈그림 10〉은 채널의 두께변화에 따른 소자의 동작전압 변화특성을 나타낸 것이다. 채널의 두께가 두꺼워질수록, 채널 저항이 낮아짐으로써, 채널은 점점 더 전도성을 나타내게 되

고, 그 결과로 소자의 동작전압은 음(-)의 방향으로 이동하게 된다.

〈그림 11〉의 경우 2개의 게이트 전극을 이용해 소자의 동작전압을 제어하는 소자의 구조에 대한 연구결과로 아랫부



〈그림 9〉 보호층에 따른 장시간 동작환경에서의 소자 특성변화



〈표 3〉 동작전압 제어방법에 따른 장단점 분석

제어방법	장점	단점
채널두께 변경	<ul style="list-style-type: none"> · 동작전압 조절의 폭이 큼 · 추가적인 소자공정이 필요하지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> · 어레이 제작과정에서 소자들의 동작전압 변화폭이 클 경우 제한적임
듀얼 게이트 전극	<ul style="list-style-type: none"> · 동작전압 조절의 폭이 큼 · 2차 게이트 전극에 의해 동작전압을 원하는 대로 변화시킬 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 추가적인 소자공정이 필요함
전극구조 변경	<ul style="list-style-type: none"> · 추가적인 소자공정이 필요하지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> · 동작전압 조절의 폭이 작음

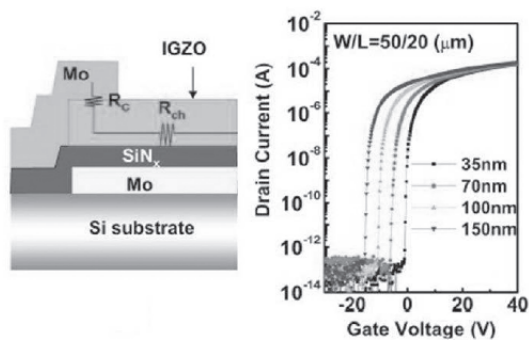
분의 게이트 전극(이하 BG)은 동작전압의 범위를 선택하기 위한 용도이고, 윗부분의 게이트 전극(이하 TG)은 소자를 스위칭하기 위한 용도이다. 그림에서 나타난 바와 같이 BG에 전압을 인가할수록 동작전압이 음(-)의 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 BG에 인가된 전압에 의해서 기본채널(background channel)이 형성되는 것으로 설명될 수 있다. 즉 BG에 의하여 기본적인 채널을 형성할 경우 TG에 의하여 형성되어야 할 채널의 폭은 BG에 의하여 형성된 채널을 제외한 나머지 부분만을 형성하면 되기 때문에, 저전압 구동이 가능하게 된다. 하지만 이러한 경우, 기존의 소자구조와는 다르게 추가적인 공정이 필요하게 되므로, 현 공정라인에서 적용하기에는 다소 제한적인 부분도 존재한다. 마지막으로 전극의 구조에 따른 동작전압 제어를 하는 방법은 기본적으로는 첫 번째 방법론의 연장선상에 존재한다고 볼 수 있는데, 소자를 제작하는 과정에서 채널의 두께가 정해졌을 경우, 소자가 갖게 될 동작전압의 대략적인 범위가 정해진다. 그 후에 전극구조를 변화시켜 작은 폭에서의 전압제어가 되는 방법이기 때문에, 굳이 따지자면 첫 번째의 방법과

크게 다르지는 않다.

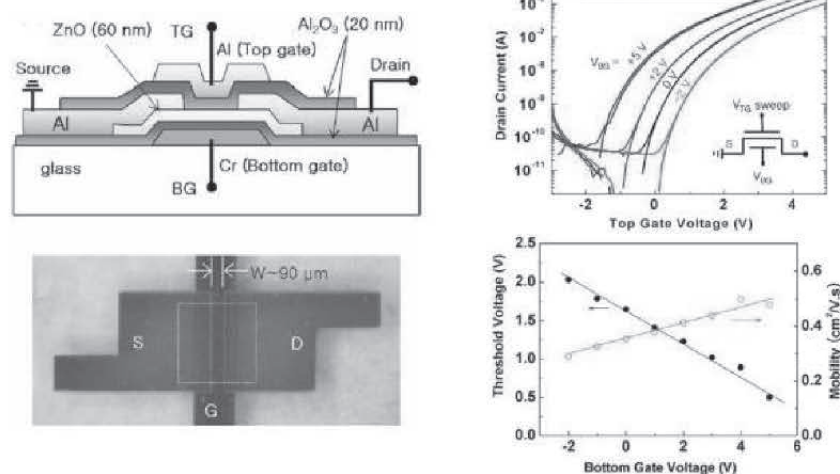
소자의 신뢰성 확보와 동작전압 제어와는 별도로 산화물 반도체의 연구개발에 있어서 아직까지도 숙제인 신뢰성 있는 p-type 산화물 반도체의 개발과 여러 가지 응용 분야에 대한 연구 또한 진행되고 있는데 그 중 대표적인 것이 CuO와 SnO의 p-type 특성 확인 및 소자특성 향상에 대한 연구가 진행되고 있다. 물론 처음에 언급한 바와 같이 ZnO에 1, 5족 원소를 도핑하여 신뢰성 있는 p-type 특성을 얻는 것이 가장 좋은 경우이겠지만, ZnO의 경우 많은 결함상태로 인해 불순물에 의하여 p-type이 되지 않고, 내부에서 보상 효과만 나타내게 된다. 물론 더 많은 불순물을 넣으면 p-type이 된다고 생각할 수도 있겠지만, 그러할 경우 도핑의 단계를 넘어서 화합물 상태로 전환되면서, 원하는 특성을 잃어버리는 경우가 있기 때문에 무조건적인 도핑이 해답은 아니다.

4. 산화물 반도체의 전망

이러한 연구 결과들을 살펴 보았을 때 산화물 반도체를 이용한 박막 트랜지스터는 낮은 공정 온도에서도 보다 높은 운반자 이동도, 높은 On-Off 전류 비, 낮은 문턱전압 및 누설전류 특성 거동을 주요 테마로 연구가 진행될 것이다. 특히 재료적인 탐색을 통하여 원천특허 확보가 가장 시급하며, 전반적인 소자성능 개선과 소자디자인 관점에서의 다양한 시도를 통해 개선된 소자구조 제시를 통한 재료·디자인의 매칭이 주요 관심사라고 볼 수 있다. 이러한 성능적인 연구 이외에도 Roll-to-Roll 공정 도입 및 용액상태의 재료를 사용한 다양한 인쇄공정의 도입을



〈그림 10〉 채널의 두께변화에 따른 소자의 동작전압 변화



〈그림 11〉 듀얼 게이트 전극 사용에 의한 소자의 동작전압 제어

통해 대량생산화를 추구한 연구 또한 계속되고 있어 추후에는 낮은 생산가격으로도 높은 성능을 가지는 투명한 Display의 제작, 공급을 기대할 수 있다. 산화물 반도체는 약 6년이라는 짧은 역사를 가지고 있지만 현재 실용화에 가까운 개발 성과를 보여주고 있으며 머지 않아 주위에서 산화물 반도체를 이용한 디스플레이를 쉽게 찾아볼 수 있을 것이다. 물론 대부분의 원천 기술은 일본이나 미국 등의 선진국이 가지고 있지만, 응용적인 측면에서는 우리나라도 상당한 기술을 가지고 있다. 산화물 반도체를 이용한 디스플레이 시장에서 꾸준한 성장을 유지하려면 응용적인 기술뿐만 아니라 독자적인 재료, 소자설계기술 그리고 대량생산기술을 개발함으로써 대외 의존도를 낮추고 양산체제를 구축하는 노력이 필요할 것이다. **ETP**

감사의 글

본고는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.2009-0083126) 및 세계수준의 연구중심대학 사업 (R32-2008-000-10082-0)의 지원 하에 수행되었다.

〈참고문헌〉

- 1) M. Orita et al., "Mechanism of electrical conductivity of transparent InGaZnO₄", PHYSICAL REVIEW B 61, 3 (2000).
- 2) D. P. Norton et al., "Synthesis and properties of epitaxial

electronic oxide thin-film materials", Materials Science and Engineering, R 43, 139-247(2004).

- 3) Satoshi et al., "Transparent thin film transistors using ZnO as an active channel layer and their electrical properties", J. Appl. Phys., 93, 3(2003).
- 4) H. Hosono et al., "Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application", J. Non-Crystalline 352, 851-858(2006).
- 5) H. Hosono et al., "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors", Nature 432, 488-492(2004).
- 6) J. ZHU et al., "ZnO TFT Device Built on Glass Substrates", J. ELECTRONIC MATERIALS 37, 9(2008).
- 7) H. S. Bae et al., "Photodetecting properties of ZnO-based thin-film transistors", Appl. Phys. Lett., 83, 5313(2003).
- 8) J. S. Park et al., "Control of threshold voltage in ZnO-based oxide thin film transistors", Appl. Phys. Lett., 93, 033513(2008).
- 9) C. H. Park et al., "Threshold voltage control in dual gate ZnO-based thin-film transistors operating at 5V", J. Phys. D: Appl. Phys., 41, 245112(2008).
- 10) H. Hosono et al., "Epitaxial growth of high mobility Cu₂O thin films and application to p-channel thin film transistor", Appl. Phys. Lett., 93, 202107(2008).
- 11) H. Q. Chiang, et al., "High mobility transparent thin-film transistor with amorphous zinc tin oxide channel layer", Appl. Phys. Lett., 86, 013503(2005).
- 12) J. S. Park et al., "Novel ZnInZnO Thin-film Transistor with Excellent Stability", Advanced Materials, 21, 329-333(2009).
- 13) J. K. Jeong et al., "Origin of threshold voltage instability in indium-gallium-zinc oxide thin film Transistors", Appl. Phys. Lett., 93, 123508 (2008).