Flexible Display용 산화물 TFT 기술개발 동향 및 전망

오 힘 찬 (한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문 신소자/소재연구부 산화물전자소자연구팀)

I. 서 론

FPD(Flat panel display)는 매우 얇고 가벼운 장점으로 과거 CRT(Cathode ray tube) 디스플레이 시장을 급속도로 잠식하였다. 이제 이 FPD를 뛰어 넘어 더 가볍고, 얇으면서 휘거나 말 수 있는 Flexible display가 차세대 디스플레이로 주목받고 있다.

평면의 형태에 한정되고 유리 기판에 형성되어 충격에 쉽게 깨질 수 있는 단점을 가진 기존의 FPD와 달리 Flexible display는 더 가벼우면서 깨어지지 않는다. 또한 다양한 형태로 형성이 가능하므로 wearable PC와 같은 혁신적인 개념의 기술에 접목될 수 있다.

이런 Flexible display의 구동을 위하여서는 저온에서 공정이 가능하면서 전기적, 기계적 특성이 우수하고, 동작 안정성이 보장되는 backplane 기술이 반드시 필요하다. 기존 glass 기판 상에서는 공정 온도를 충분히 올릴 수 있어 구동에 필요한 소자의 특성, 즉 이동도, 고신뢰성을 쉽게 얻을 수 있었으나 유연 기판의 경우 고온 공정이 불가능하므로 고성능, 고안정성의 저온 backplane 기술 개발이 시급하다 할 수 있다.

디스플레이 backplane 기술에는 amorphous Si나 poly-Si과 같은 기존 Si 기반 TFT, 유기물 반도체 TFT, 그리고 산화물 반도체를 이용한 TFT를 들 수 있다.

Si 기반의 재료인 amorphous Si은 저온 공정이 가능한 장점이 있으나 이동도가 낮고 소자의 동작 신뢰성에 문제가 있다. 이를 결정화 한 poly-Si은 이동도가 amorphous Si에 비해 향상되는 반면 결정화 공정에서 발생하는 문턱전압의 불균일성 문제점을 지니고 있다. 유기물 반도체 재료의 경우 저온 공정이 용이하고 저가격의 장점이 있다. 그러나 낮은 이동도와 동작 불안정성 측면에서 개선해야할 여지가 아직도 많이 남아 있는 실정이다.

전술한 기존 Si 및 유기물 반도체 재료의 한계를 극복할 수 있는 점들이 보고되면서 산화물 반도체는 차세대 디스플레이용 소자의 활성층 재료로서 주목을 받고 있다. amorphous Si나 유기물 반도체에 비해 이동도가 높을 뿐 아니라 동작 신뢰성도 우수하다. 동시에 다성분계 금속 산화물 재료의 경우 비정질 특성을 가지고 있기 때문에 poly-Si과는 달리 문턱전압의 불균일성 문제에서 자유롭고 우수한 대면적 균일도를 확보할 수 있다.

2004년 말 일본 동경공대(TIT, Tokyo Institue of Technology)의 히데오 호소노(Hideo Hosono) 그룹에서 발표한 비정질 산화물 박막 트랜지스터(a-IGZO TFT, amorphous In-Ga-Zn-O)를 시작으로 산화물 반도체는 산학연에서 매우 활발히 연구되고 있다.[1] 방대한 숫자의 관련 문헌 및 특허, 발표된 시제품의 수가 이를 증명하고 있다. 그 결과 산화물 반도체는 유리 기판과 같은 경질 기판 상에서 LCD, OLED, 전자종이의 backplane 기술로서의 검증이 거의 완료된 상태이다. 다만 빛에 노출된 상태에서 동작 안정성의 문제가 분명하게 해결되지 못한 상태이며 이를 해결하기 위한 연구가 마지막 남은 이슈로서 진행되고 있다.

기술 수준이 성숙단계에 오른 산화물 반도체의 새로운

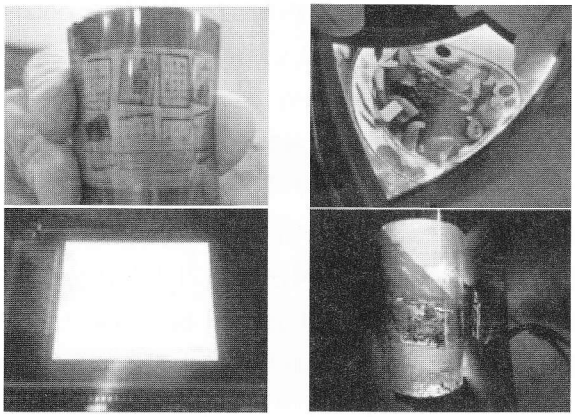
화두 중 하나는 바로 flexible 기판 상에 고성능, 고안정성의 박막 트랜지스터를 구현하는 것이다. 특히나 저온에서의 고신뢰성 확보는 산화물 반도체 연구, 개발자들에게 새로운 도전 과제라고 할 수 있다. 본고에서는 지금까지 발표된 사례들을 살펴봄으로써 flexible display 용 산화물 트랜지스터의 기술 개발 동향을 파악하고 향후 전망에 대하여 논하고자 한다.

Ⅱ. flexible oxide TFT 기술 개발 동향

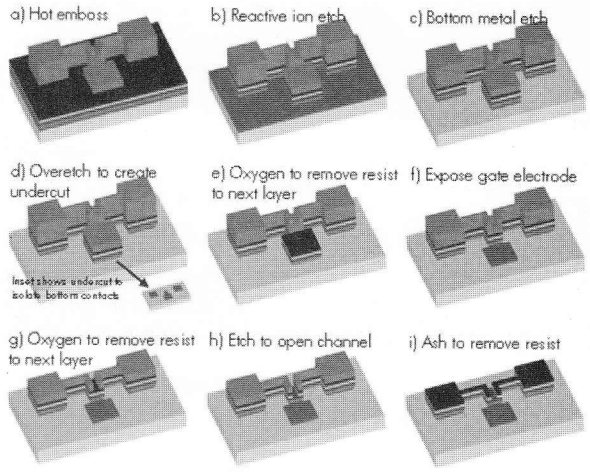
1. 산화물 TFT 구동의 flexible display

산화물 반도체를 이용한 첫 flexible display 발표는 2005년 일본 Toppan의 a-IGZO TFT array를 적용한 흑백 전자종이였다.[2] 그들은 유연한 poly[ethylene naphthalate](PEN) 기판에 스퍼터링 방법으로 IGZO 반도체 층을 형성하였다. 이후에도 Toppan에서는 산화물 반도체를 적용하여 보다 큰 사이즈인 5.35인치의 150 ppi 해상도를 갖는 전자종이를 발표하였으며 2인치의 400 ppi 급 고해상도 전자종이를 발표한 바 있다.[3]

국내의 LG 전자에서는 처음으로 flexible stainless foil 상에 산화물 반도체를 이용하여 3.5인치 QCIF+급 AMOLED를 발표하였으며 SMD에서는 polyimide(PI) 기판에 6.5인치 flexible WQVGA AMOLED를 발표하였다.[4,5]



[그림 1] (a) Toppan Printing(흑백 EPD), (b) LG 전자(서스 기판상에 제작한 flexible AMOLED), (c) ETRI(arylite 기판상에 150℃ 공정으로 제작한 ZnO TFT), (d) SMD(용액공정 폴리이미드 상에 제작한 IGZO TFT)



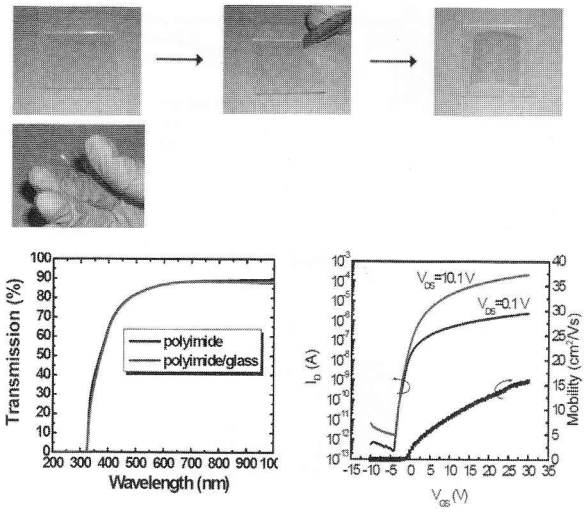
[그림 2] HP의 Self-Align Imprint Lithography를 통한 Zinc Tin Oxide TFT 제작 공정 흐름[6]

발표된 flexible display 들의 크기 자체는 작지만 산화물 반도체가 성공적으로 active matrix display를 구동할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 LG 전자와 SMD에서 제작한 산화물 TFT 는 고온용 플렉시블 기판을 사용하여 유리 기반의 고온 공정을 그대로 이용해 제작한 것으로 새로운 기술의 적용은 없었다. ETRI에서는 저온에서도 우수한 특성의 절연막 증착이 가능한 ALD(atomic layer deposition)를 이용하여 arylite 기판상에 150 도 공정으로써 2.5" QVGA AMOLED를 발표하였다.

한편, 대면적 산화물 TFT 기반 flexible display를 위한 기술로서 2009년 SID에서 발표된 HP의 Self-Aligned Imprint Lithography(SAIL) 기법을 적용한 산화물 TFT 공정에 주목할 만하다. 공정 중 불균일하게 늘어나거나 수축될 수 있는 플라스틱 기판에서는 미세 패턴간의 align이 쉽지 않은데 self-align 기법을 통해서 미세 패턴을 쉽게, 그리고 정밀하게 형성할 수 있고 roll to roll process에 적용될 수 있어 산업적인 측면에서 임팩트가 크다고 할 수 있다.[6]

2. High performance flexible 산화물 TFT 기술

높은 이동도 특성은 고해상도 및 높은 frame rate의 능동 구동 디스플레이를 실현하기 위해서, 또한 전류 구동



[그림 3] ITRI에서 발표한 무색 투명한 PI film 상에 제작된 IGZO TFT 및 그 특성[7]

방식인 OLED 디스플레이의 높은 휘도를 위해서 필수라고 할 수 있다.

2004년 말 발표된 첫 flexible oxide TFT의 이동도는 8.3cm^2/Vs 로 낮은 수준이었고 on/off 전류비 또한 ~10^{3}으로 낮았으나 최근 보고 되고 있는 flexible oxide TFT의 이동도는 20cm^2/Vs를 상회하고 on/off 비가 ~10^6 을 넘는 등 괄목할 만한 진전이 있었다. 예로 2010년 대만 ITRI에서는 자체 개발한 무색 투명한 PI film 을 유리 기판에 코팅하고 이를 기판으로 고성능 a-IGZO TFT 소자를 제작하였다. Polyimide film의 탈착이 용이한 것이 특징이고 Ti/IZO의 이중 전극을 사용하여 Ti dry etching 중 발생하는 PI에의 damage를 IZO로 막아 소자의 성능 향상을 꾀했다.[7]

하지만 이러한 특성의 향상은 대부분 고온 공정이 가능한 기판의 선택에 따른 것으로 [표 1]에 현재까지 발표된 몇 가지 flexible oxide TFT 들의 특성을 정리하였다. 산화물 반도체 박막을 상온에서 스퍼터링 방법을 통하여 형성하여 제작한 트랜지스터도 특별한 추가 열처리 없이 만족할 만한 수준의 이동도(~10cm^2/Vs)를 얻을 수 있다. 여기에 통상 flexible 기판이 견딜 수 있는 온도 150~200도에서 열처리를 하여 주면 좀 더 이동도를 향상 시킬 수 있고 SS(sub-threshold swing) 특성이 개선 될 수 있다.

따라서 앞서 정리한 다수의 연구결과와 같이 전기적 특성이 좋은 flexible oxide TFT 구현은 현재 기술적으로 크게 이슈가 되지 않는 것이 사실이며 최근의 연구 개발 트렌드는 저온 공정에서 동작 신뢰성을 확보하는 쪽으로 집중되고 있다.

3. Highly reliable flexible 산화물 TFT 기술

앞서 언급하였듯이 산화물 TFT에서 고이동도 등의 우수한 전기적 특성을 얻기는 용이하나 그와 동시에 전기적, 광학적, 환경적 요인에 대한 높은 동작 신뢰성을 갖는 소자를 만드는 것은 간단치 않다. 예로 거의 동일한 수준의 우수한 특성을 갖는 소자라고 할지라도 전압 신뢰성에서 현격한 차이가 발생할 수 있다.[14]

산화물 반도체의 동작 불안정성을 야기시키는 원인은 여러 가지가 있으며 그중 게이트 절연막의 특성은 무엇보다도 중요한 요인으로 작용한다. 특히 산화물 반도체의 전기적 특성이 shallow donor인 H의 도핑 정도에 따라 크게 변하는 것을 고려할 때 게이트 절연막내에 포함된 수소의 양에 따른 특성변화를 예상할 수 있다. 보통의 경우 SiN를 절연막으로 사용 시, SiO_2를 사용하는 경우데 비해

[표 1] 발표된 flexible oxide TFT의 device performance.

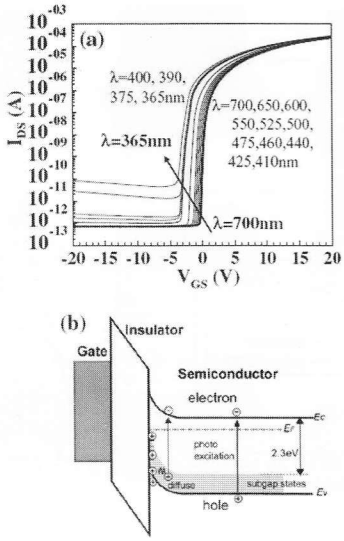
Active	Gate insulator	Substrate	u(cm²/Vs)	SS(V/dec)	on/off 비	V_T(V)	$T_{Max.\ process\ temp.}$(℃)
ZnO[8]	PMMA	PET	7.53	〉2	10^4	5.4	150
ZTO[9]	Al_2O_3	PI	14(incremental)	1.6	10^6	-8.8	250
IGZO[10]	Y_2O_3	PET	3.9	0.2	1.7*10^6	3.9	~140
IGZO[11]	SiON	PEN	5.1	-	10^6	5.8	RT
IGZO[12]	SiN_X	PET	12.1	0.35	10^5	1.25	90
IGZO[5]	SiN_X	PI	15.1	0.25	5*10^8	0.9	350
IGZO[13]	$MgO_{0.3}BST_{0.7}$	PET	21.34	0.42	8.27*10^6	2.2	-

바이어스 스트레스 특성이 더 좋지 않으며 이는 인터페이스에 존재하는 수소와 관련된 결함에 의한 것으로 해석된다.[14] 소자의 flexibility를 확보하기 위한 방안으로 유기물 절연막을 사용하는 시도가 발표되었는데 이 경우 OH(hydroxy group)에서 야기되는 모바일 입자로 인하여 심각한 히스테리시스를 야기한다.[15] 반면, ETRI에서는 유/무기 hybrid 절연막을 도입함으로써 10^9 이상의 on/off ratio와 함께 6.65 cm^2/V.s의 이동도 특성을 발표하였다. 이 경우 바이어스 스트레스에 따른 신뢰성 특성도 우수하여 10^4 초 동안 0.99 V의 V_{th}(threshold voltage) 이동을 보였다.

산화물 TFT의 신뢰성은 환경적 요인에 의해서도 크게 영향을 받음이 밝혀진 바 있다. Bottom gate 구조의 소자에서 대기중에 노출된 산화물 반도체의 back surface에 산소, 수분의 흡, 탈착으로 인하여 V_{th}가 급격하게 바뀌게 된다.[16~18]

이렇게 back channel이 노출됨으로써 생긴 불안정성은 고밀도의 보호층을 back surface에 적용함으로써 해결되었다. SiO_2 [19], SiN_x [20], Al_2O_3 [21,22], TiO_2 [23,24] 등 다양한 종류의 보호층이 개발, 보고되었으며 환경 요인으로 인한 전압 불안정성을 아주 효과적으로 억제시킬 수 있음이 증명 되었다. 한편 Top gate 소자의 경우는 게이트 유전막 자체가 산화물 반도체를 보호하는 층의 역할을 하게 된다. 이러한 연구 결과 전압 스트레스에 대하여 V_{th}의 이동이 극히 적은 고신뢰성 소자들이 여럿 발표되었다. 그러므로 산화물 TFT를 이용한 플렉시블 디스플레이 구현을 위해서는 passivation 층의 확보가 아주 중요하다.

전기적 스트레스에 대한 신뢰성 문제는 해결된 반면에 [그림 2]와 같이 빛에 노출되었을 때의 불안정성은 아직까지 분명하게 해결되지 못하고 있다. 특히나 음의 게이트 전압이 가해진 상태에서 빛에 노출 될 경우 V_{th}의 이동량이 급격히 증가한다. 이는 빛에 의해 생성된 정공들이 음의 게이트 전압에 이끌려 유전막/반도체 계면에 트랩핑 되면서 발생하는 것으로 알려져 있다.[25] 산화물 반도체의 밴드갭(~3.1eV)보다 더 적은 에너지를 갖는 파장의 빛에 대해서도 정공이 생성될 수 있는 것은 밴드갭내에 결함으로 인한 subgap state가 존재하기 때문이다. 이 들 gap

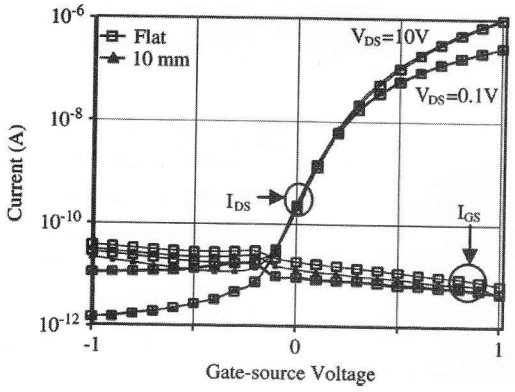


[그림 4] (a) 다양한 파장의 빛에 노출된 IGZO TFT의 transfer curve, (b) 광조사하에서 negative gate bias stress 메커니즘[25]

state의 존재는 산소 결핍에 기인한 것으로 알려져 있어 결함 농도를 최소화 시키는 것이 빛에 대한 안정성을 높이는 방법이라고 할 수 있다. 예로, 최근 Hf이 들어간 HfInZnO TFT에서 Hf를 첨가할 수록 광전압신뢰성이 향상됨이 보고된 바 있다. Hf의 높은 산소와의 결합능력이 이를 가능케 한다고 설명되고 있다.[26]

flexible 기판에 소자를 형성하기 위해서 공정 온도가 낮아지면 앞서 언급한 전기적, 빛에 대한 동작 신뢰성 확보가 어려워 진다. 저온에서 신뢰성을 확보 하기 위한 방안의 예로 ZnO 기반 산화물 반도체에 Si, Al 을 첨가 하여 반도체 재료 자체의 특성을 제어하는 방법 [27,28] 및, UV 광원이나 laser를 조사하여 플라스틱 기판에 데미지를 주지 않고 어닐링 효과를 얻는 방법들이 발표되고 있다. [29,30] 하지만 아직 고온 공정 소자의 신뢰성 수준에는 많이 미치지 못하고 있는 실정이다.

flexible 소자로 넘어오게 되면 전기적 스트레스 뿐만 아니라 기계적인 스트레스에 대한 안정성 또한 중요하며 반드시 평가 되어야 할 것이다. 하지만 아직 관련된 연구들이 부족한 편이다. 최근 보고된 ZnO와 IGZO를 사용한 TFT의 bending TEST 결과를 보면 ZnO의 경우 미세크랙의 발생으로 bending radius가 15mm 이하가 되면 이동도 및 SS, V_T 특성이 급격히 변한다. 반면 IGZO의 경우



[그림 5] 반듯한 상태와 10mm의 곡률반경으로 구부렸을 때의 IGZO TFT transfer 특성 [31]

5mm 로 심하게 구부린 후에도 변화가 미미하여 IGZO가 기계적 스트레스에도 강성한 재료임이 증명된 바 있다.[31]

Ⅲ. 향후 기술 개발 전망

저온 공정에서도 높은 전기적 특성을 용이하게 얻을 수 있고 기계적 스트레스에 대한 저항성도 우수한 것이 입증된 만큼 산화물 반도체는 flexible electronics에 널리 적용될 것으로 기대된다.

다만 고온 공정의 산화물 TFT가 보여주는 아주 높은 전기적 신뢰성이 flexible 기판상에서 실현되기 까지는 앞으로 적지 않은 연구, 개발이 필요할 것으로 예상된다.

특히 산화물 반도체 내부에 존재하고 있는 결함을 어떻게 최소화 할 것인가가 관건이라고 생각된다. 비교적 고온에서의 후처리를 통해 결함 농도를 감소시켜 왔지만 이제는 박막 형성 단계에서부터 어떻게 고품질의 박막을 얻을 수 있는가에 포커스를 맞추어야 할 것으로 보인다. 또한 산화물 반도체 재료의 전기적, 구조적 강성을 높이는 전략이 필요할 것으로 예측 된다. 이를 위해서 Hf, Al, Si 과 같은 원소들의 최적화된 첨가에 대한 연구, 개발이 필요할 것으로 본다.

Si이나 유기물 기반 기술 대비 소재, 소자에 대한 이해도가 부족한 것이 사실이지만 2004년 말 첫 TFT 적용 보고 이후 비정질 산화물 반도체 재료 또한 폭넓고 심도 있는 연구들이 많이 진행되어 온 것이 사실이다. 이를 바탕으로 저온공정 소자의 신뢰성 문제도 충분히 극복할 수 있으리라 전망된다.

참고문헌

[1] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono, Nature, 432, 488 (2004).

[2] M. Ito, M. Kon, T. Okubo, M. Ishizaki and N. Sekine Proc. Int. Display Workshop/Asia Display 2005 p.845 (2005).

[3] M. Ito, C. Miyazaki, N. Ikeda and Y. Kokubo 16th Int. Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices S-2 (2009).

[4] 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 7th Int. Meeting Information Display 9-1 (2007).

[5] J-S. Park, T. Kim, D. Stryakhilev, J-S. Lee, S-G. An, Y-S. Pyo, D-B. Lee, Y. G. Mo, D-U. Jin and H. K. Chung Appl. Phys. Lett. 95 013503 (2009).

[6] W. Jackson, C. Taussig, R. Elder, SID 09 digest, 873 (2009).

[7] C-W. Chien, H-H. Hsieh, C-H. Wu, Y-T. Tsai, Y-C. Kung, P-C. Hsu, C-Y. Lin and C-C. Wu, SID 10 digest, 921 (2010).

[8] C. Y. Lee, M. Y. Lin, W. H. Wu, J. Y. Wang, Y. Chou, W. F. Su, Y. F. Chen and C. F. Lin Semicond. Sci. Technol, 25, 105008 (2010).

[9] W. B. Jackson, R. L. Hoffman, G. S. Herman, Appl. Phys. Lett. 87, 193503 (2005).

[10] H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, and H. Hosono, Thin Solid Films, 516, 7, 1516-1522 (2008).

[11] M. Ito, M. Kon, C. Miyazaki, N. Ikeda, M. Ishizaki, R. Matsubara, Y. Ugajin, and N. Sekine, Phys. Stat. Sol. A, 205, 8, 1885-1894 (2008).

[12] W. Lim, J. H. Jang, S.-H. Kim, D. P. Norton, V. Craciun, S. J. Pearton, F. Ren, and H. Shen, Appl. Phys. Lett., 93, 082102 (2009).

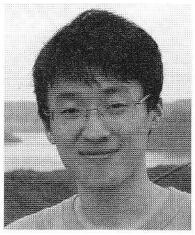
[13] D. H. Kim, N. G. Cho, S. H. Han, H.-G. Kim, and I.-D. Kim, Electrochem. Solid-State Lett., 11, 12, H317 -H319 (2008).

[14] J. Lee, J.-S. Park, Y. S. Pyo, D. B. Lee, E. H. Kim, D. Stryakhilev, T. W. Kim, D. U. Jin, and Y.-G. Mo, Appl. Phys. Lett. 95, 123502, (2009).

[15] L. Wang, M.-H. Yoon, G. Lu, Y. Yang, A. Facchetti, and T. J. Marks, Nature materials, 5,893, (2006).
[16] D. Kang, H. Lim, C. Kim, I. Song, J. Park, Y. Park and J. Chung Appl. Phys. Lett. 90 192101 (2007).
[17] J-S. Park, J. K. Jeong, H-J. Chung, Y-G. Mo and H. D. Kim Appl. Phys. Lett. 92 072104 (2008).
[18] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y-G. Mo and H. D. Kim Appl. Phys. Lett. 93 123508 (2008).
[19] B-S. Jeong et al Digest of Int. Meeting on Information Display p. 1040 (2009).
[20] A. Sato, K. Abe, R. Hayashi, H. Kumomi, K. Nomura, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono Appl. Phys. Lett. 94 133502 (2009).
[21] M. K. Ryu et al Digest of Int. Meeting on Information Display p. 330 (2009).
[22] T. Arai, N. Morosawa, K. Tokunaga, Y. Terai, E. Fukumoto, T. Fujimori, T. Nakayama, T. Yamaguchi and T. Sasaoka Digest of SID2010 p. 1033 (2010).
[23] M-C. Hung, W-T. Lin, J. J. Chang, P-L. Chen, C-Y. Wu, C-J. Lin, H-L. Chiu, C-Y. Huang and Y-C. Kao Int. Workshop on Transparent Amorphous Oxide Semiconductors (2010).
[24] H-S. Seo, J-U. Bae, D-H. Kim, Y. Park, C-D. Kim, I. B. Kang, I-J. Chung, J-H. Choi and J-M. Myoung Electrochem. Solid State Lett. 12 H348 (2009).
[25] T. Kamiya, K. Nomura and H. Hosono, Sci. Technol. Adv. Mater 11 044305 (2010).
[26] J. C. Park, S. Kim, S. Kim, C. Kim, I. Song, Y. Park, U-I. Jung, D. H. Kim, J-S. Lee Adv. Mater. 22, 5512-5516, (2010).
[27] E. Chong, Y. S. Chun, S. Y. Lee, Appl. Phys. Lett. 97, 102102 (2010).
[28] C. H. Ahn, B. H. Kong, H. Kim and H. K. Cho, J. Electrochem. Soc. 158 (2) H170-H173 (2011).
[29] M. Nakata, K. Takechi, T. Eguchi, E. Tokumitsu, H. Yamaguchi and S. Kaneko Jpn. J. Appl. Phys. 48 081607 (2009).
[30] H-W. Zan, W-T. Chen, C-W. Chou, C-C. Tasi, C-N. Huang and H-W. Hsueh, Electrochem. Solid-state Lett. 13 H144-H146 (2010).
[31] K. H. Cherenack, N. S. Munzenrieder and G. Troster, IEEE Electron Device Lett. 31, 11 (2010).

저 자 약 력

오 힘 찬



- 2008년 : 서울대학교 재료공학부 공학사
- 2010년 : 서울대학교 재료공학부 공학석사
- 2010년~현재 : 한국전자통신연구원 연구원
- 관심분야 : Semiconducting oxide material