

# 투명 ZnO를 활성 채널층으로 하는 박막 트랜지스터

## Thin Film Transistor with Transparent ZnO as active channel layer

申白均<sup>†</sup>  
(Paik-Kyun Shin)

**Abstract** - Transparent ZnO thin films were prepared by KrF pulsed laser deposition (PLD) technique and applied to a bottom-gate type thin film transistor device as an active channel layer. A high conductive crystalline Si substrate was used as an metal-like bottom gate and SiN insulating layer was then deposited by LPCVD(low pressure chemical vapour deposition). An aluminum layer was then vacuum evaporated and patterned to form a source/drain metal contact. Oxygen partial pressure and substrate temperature were varied during the ZnO PLD deposition process and their influence on the thin film properties were investigated by X-ray diffraction(XRD) and Hall-van der Pauw method. Optical transparency of the ZnO thin film was analyzed by UV-visible photometer. The resulting ZnO-TFT devices showed an on-off ration of  $10^6$  and field effect mobility of  $2.4\text{-}6.1\text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ .

**Key Words** : Transparent ZnO, TCO, Pulsed Laser Detposition, TFT

### 1. 서 론

최근 10년 사이에 평판 디스플레이 소자의 개발 기술이 눈부시게 발달하고 있으며, 이들 중 액정 디스플레이(LCD) 및 유기EL 소자(OLED)의 성능향상에 관한 연구방향은 소자 자체의 특성 보다는 구동기술 등의 개선이 보다 중점적이다. 현재 LCD 및 OLED의 active matrix 형 구동방식을 위한 소자로는 박막 트랜지스터(Thin Film Transistor)가 주로 사용되고 있으며, 저가의 대면적 디스플레이 구동에는 비정질 실리콘(a-Si)을 활성 채널층(active channel layer)으로, 고가의 중·소면적 디스플레이 구동에는 다결정 실리콘(poly-Si)을 활성 채널층으로 하는 박막트랜지스터가 사용되고 있다. 이러한, 비정질 실리콘 및 다결정 실리콘을 기반으로 하는 박막 트랜지스터 소자는 이론적 연구와 상용화 기술이 발전하여 성숙단계에 접어들고 있으나, 두 물질 모두 가시광 영역의 광투과율이 미소하기 때문에 평판 디스플레이 구동에 사용될 경우 단위 픽셀 당 밝기가 감소하는 단점이 있다. 또한, 이들은 그 내부에 가시광으로 인해 유도되는 광 캐리어가 생성되어 열화되는 경향이 있기 때문에 억제하기 위해 가시광의 차단을 고려해야 하는 단점이 있다.

광전자 소자, 평판 디스플레이 및 솔라셀 등에는 다양한 투명 전도성 산화막(TCO; transparent conductive oxide)이 응용되고 있으며, TCO 물질 중에서는 현재 ITO (Indium-Tin-Oxide)가 가장 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 ITO는 화학적으로 불안정하고, 고가인 단점이 있으므로, ITO의 이러한 단점들을 극복할 수 있는 다른 TCO 물질의 개발에 관한

연구가 활발히 진행되고 있다. ZnO는 이런 관점에서 가장 주목을 받고 있는 물질이다<sup>1)</sup>. ZnO 박막 제작은 마그네트론 스퍼터링<sup>2)</sup>, 펄스 레이저 증착법<sup>3)</sup>, MBE(molecular beam epitaxy)<sup>4)</sup> 및 sol-gel법<sup>5)</sup> 등 다양한 공정기술로 가능하며, ZnO 박막은 가시광 투명도가 80% 이상으로 우수하고, c-축 방향성<sup>6,7)</sup>을 보인다는 연구보고들이 있다. 또한, ZnO는 3.35eV의 비교적 넓은 다이렉트 밴드갭을 갖게 때문에, ZnO를 활성 채널층으로 하는 박막 트랜지스터를 제작할 경우, 가시광의 노출에도 열화 되지 않는 특성을 가질 수 있다. 아울러, ZnO는 최근 차세대 디스플레이 기술로 각광을 받고 있는 투명 평판 디스플레이 및 flexible 디스플레이에서 필요한 ITO 대체용 투명전극용 물질로도 유망하다.

본 연구에서는 타겟 조성에 매우 근접한 박막 제작이 가능한 펄스 레이저 증착법(PLD; pulsed laser deposition)을 사용하여 ZnO 박막을 제작하였으며, 공정조건 변화에 따른 ZnO 박막의 전기적, 광학적 및 결정성 특성을 조사하였다. 그 기초 결과를 고려하여 전도성이 높은 결정성 실리콘(c-Si)을 기판 겸 전극으로 하고, 저압화학기상증착법(LPCVD)으로 성장된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막을 절연층으로 하는 bottom-gate 형 박막 트랜지스터 소자 구조에 ZnO 박막을 활성 채널층으로 응용하였다. 펄스 레이저 증착 공정 파라미터가 완성된 박막 트랜지스터 소자의 주요 특성인 전계효과이동도(field effect mobility,  $\mu_{FE}$ ) 및 on-off ratio 등에 미치는 영향을 조사 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 ZnO 박막의 펄스 레이저 증착 및 박막 트랜지스터 소자의 제작

본 연구에서 제작된 ZnO 박막은 quartz glass 및 p-type

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 仁河大學校 電子電氣工學部 助教授 · 工博  
E-mail : shinsensor@inha.ac.kr

接受日字 : 2005年 9月 24日

最終完了 : 2005年 10月 18日

Si 기판을 에탄올 및 아세톤으로 각각 5분간 초음파 세척한 후,  $5 \times 10^{-5}$  Torr 진공도의 챔버에 설치하고 순도 99.9%의 상용 ZnO (Tohwa Chemical, Japan) 타겟을 일정 회전수로 회전시키면서 KrF 펄스 레이저 빔( $\lambda=248$  nm, pulse duration 25 ns, 주파수 10 Hz, 레이저 에너지 200 mJ)을 조사하여 증착하였다. ZnO 박막의 펄스 레이저 증착 시에 산소 가스의 유입 유량을 각기 5, 50, 100, 200 mTorr의 분압이 되도록 조절하였다. 또한, 기판을 적외선 조사법으로 가열시켰으며, 기판의 온도는 100, 200, 300 및 400°C가 되도록 변화시켰다. 한편, ZnO 타겟과 기판 사이의 간격은 40 cm로 일정하게 유지하였다.

ZnO (100nm)를 활성 채널층으로 하는 박막 트랜지스터 소자는 게이트 전극 역할을 겸하도록 도핑된 결정성 Si 위에 LPCVD 법으로 100 nm 두께의 SiN 박막을 절연층으로 올리고, 상기한 다양한 특성의 ZnO 박막을 활성 채널층으로 제작한 후, 진공증착법으로 제작된 Al 전극을 80  $\mu$ m의 간격을 갖는 소스/드레인 컨택으로 패터닝하여 제작하였다. 그림1에 이러한 ZnO-TFT 소자의 구조가 나와 있다.

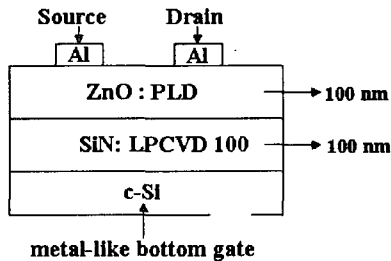


그림 1 bottom-gate type ZnO-TFT 소자의 구조  
Fig. 1 Structure of the bottom-gate type ZnO-TFT

### 2.2 ZnO 박막 및 투명 ZnO-TFT 소자의 특성

산소분압 및 기판 온도를 달리하여 펄스 레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막의 광학 투명도(optical transmission)를 실온에서 UV-visible photometer를 사용하여 조사한 결과, 기판 온도에 영향을 받지 않고 80% 이상의 광학 투명도를 보인 반면, 산소 분압에 따라 각기 다른 광학 투명도를 보였으며, 200 mTorr의 산소 분압에서 제작한 시편을 제외한 다른 박막은 모두 가시광 영역에서 80% 이상의 광학 투명도를 보임을 확인하였다. 따라서, 박막 트랜지스터 소자에 적용될 ZnO 박막은 200 mTorr 이하의 산소분압에서 제작하였다. 그림2에 산소분압과 기판 온도를 달리하여 제작된 ZnO 박막의 광학 투명도를 조사한 결과 나와 있다.

ZnO 박막의 결정성은 XRD법으로 조사하였으며, 하나의 우세한 피크( $2\theta=34.5^\circ:(002)$  방향성)와 다른 하나의 미약한 피크( $2\theta=72.5^\circ(004)$  방향성)가 관찰되었으며, 따라서, 펄스 레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막이 우수한 c-축 배향성을 가짐을 확인할 수 있었다. 증착 공정시 파라미터 변화가 ZnO 박막의 결정에 미치는 미세한 영향은 각  $2\theta=34.5^\circ(002)$  피크의 FWHM (full width half maximum)을 조사하여 수행하였으며, 그림3에 그 결과가 나와 있다. FWHM 값은 분석된 ZnO 박막의 XRD 피크의 최대반전폭 값이며, 그 크기가 작을 수록 결정입자 크기가 크고 결정성이 더 우수함을 나타낸다. 따라서, 펄스 레이저 증착법으로 ZnO 박막을 제작할 경우, 산소압력이 작을 수록, 기판 온도가 높을수록 결정성이

더 우수한 박막을 제작할 수 있음을 볼 수 있다.

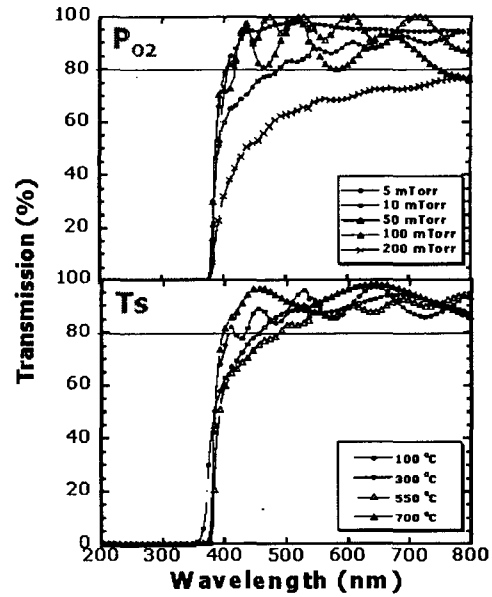


그림 2 펄스레이저증착기술로 제작된 ZnO 박막의 광학투명도  
Fig. 2 Optical transmission properties of the ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition technique

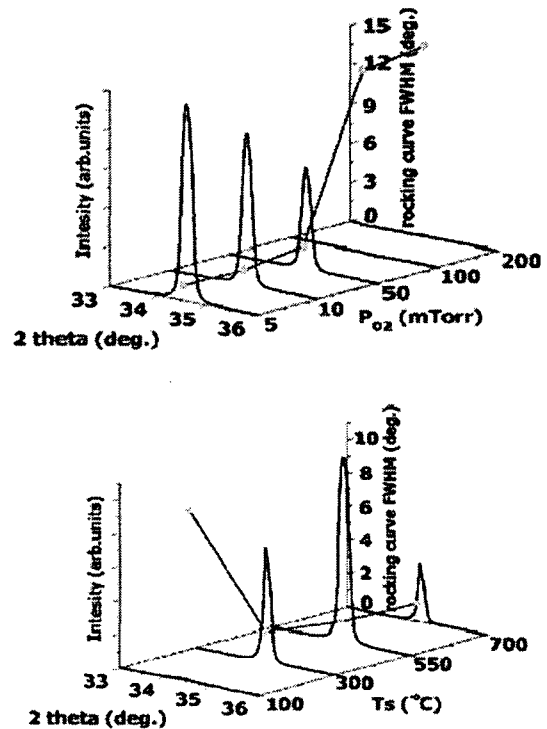


그림 3 펄스레이저증착기술 제작된 ZnO 박막의 결정성  
Fig. 3 Crystallinity of the ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition technique

산소압력 및 기판온도 변화에 따른 ZnO 박막의 전기전도도는 Hall-van der Pauw 측정법으로 조사하였으며, 그 결과

가 그림4에 나와 있다. ZnO 박막을 TFT의 활성 채널층에 사용하기 위해서는 낮은 전자 농도 즉, 높은 저항이 요구된다. PLD법으로 제작된 ZnO 박막의 저항값( $\Omega\text{cm}$ )은 산소압력에 관계없이 유사한 경향을 보인 반면, 기판 온도를 높일수록 증가하는 경향을 보였다.

위와 같은 결과들로 미루어 볼 때, 본 연구에서 펄스 레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막을 박막 트랜지스터로 응용하기 위해서는 기판 온도를 판 온도를 300°C 이상으로, 산소압력은 200 mTorr 이하로 하여야 함을 예상할 수 있다. 한편, 평판 디스플레이의 active matrix 구동용 박막 트랜지스터 소자는 액정 디스플레이의 경우, 450°C 이하에서 열안정성을 갖는 유리기판 위에 제작되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기판온도를 400°C 이하 하는 조건에서 펄스 레이저 증착법으로 ZnO 박막을 제작하여 박막 트랜지스터의 활성 채널층으로 응용하였다. 소자 제작시, 기판 온도를 낮게 할수록 전체 제작 단가를 절감할 수 있으며, 고온 공정시 수반되는 다른 부분의 열적 변화에 의한 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다.

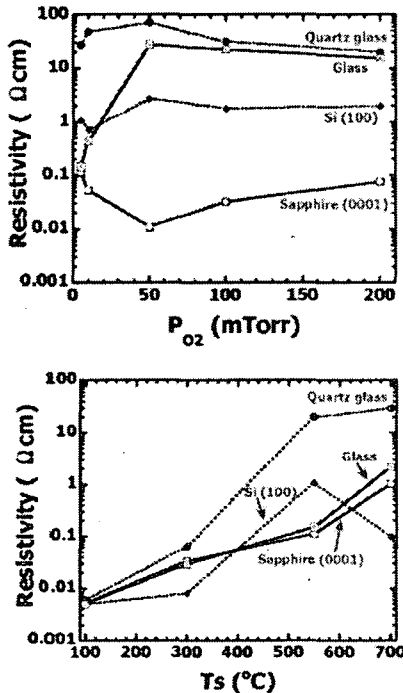


그림 4 펄스레이저증착기술로 제작된 ZnO 박막 전기전도도  
 Fig. 4 Electrical conductivity properties of the ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition technique

이와 같은 기초 특성을 갖는 ZnO 박막이 박막 트랜지스터 소자의 활성 채널층으로 사용될 경우 신뢰성 있는 소자로 동작이 가능한 지 여부를 검토하기 위해 HP4140B picoammeter를 사용하여 전류-전압(I-V) 특성을  $V_{sd}=1V$  로 하고, 게이트 전압  $V_g$ 를 -10~30V로 변화시키는 조건에서 측정하였다. 전류-전압 특성 측정을 통하여 ZnO-TFT 소자의 전계효과이동도(field effect mobility,  $\mu_{FE}$ ) 및 on-off ratio 특성을 분석할 수 있었다. 그림5에 펄스 레이저 증착법으로 다양한 조건에서 제작된 ZnO-TFT 소자의 대표적인 전류-전압 특성이

나와 있으며, 산소압력이 100 또는 200 mTorr 이고, 기판온도는 100°C에서 400°C로 100°C 씩 변화시킨 ZnO 박막으로 제작한 TFT 소자의  $I_{ds}-V_{gs}$  특성곡선을 보여주고 있다. ZnO-TFT 소자의 전계효과이동도는 기판온도에 관계없이 현재까지 보고된 바 있는 다른 TCO 보다 우수한  $2.4\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$  이상의 값을 보였으며, 100°C 및 200°C로 낮은 온도에서 제작된 ZnO 박막을 활성층으로 하는 경우에는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 기판 온도 300°C 및 400°C에서 제작된 ZnO 박막을 활성층으로 박막트랜지스터의 경우에는  $5.2\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$  이상의 값을 보였으며, 우수한 전계효과이동도를 달성하기 위해서는 기판 온도가 높아야 함을 알 수 있었다. on-off ratio 특성에서는 ZnO 박막 제작시 기판 온도에 따른 영향이 현저하지는 않았으나, 역시 기판 온도가 높을 경우  $10^6$  수준의 특성을 보였다. 본 연구에서 제작된 ZnO-TFT 소자 중에서는 기판온도 300°C 및 산소분압 100mTorr에서 제작된 소자가 전계효과이동도  $6.1\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$ , on-off ratio가  $10^6$  수준으로 가장 우수하였다.

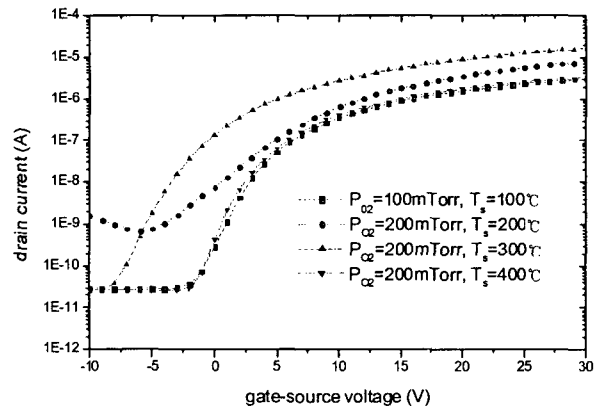


그림 5 ZnO-TFT 소자의 전류-전압 특성  
 Fig. 5 I-V characteristics of the ZnO-TFT device

ZnO 공정 시 산소압력 변화에 따른 TFT 특성 변화를 측정 한 결과, ZnO-TFT 소자는 기판 온도에 관계없이 진공 중 또는 5 mTorr 산소압력에서 제작된 것이 더 높은 산소압력에서 제작된 소자에 비해 열악한 TFT 특성을 보였다. 반면에, 전계효과이동도는 기판온도가 높을수록 좋아지는 결과를 보였다. 이는 전절에서 기술한 바와 같이, 더 높은 기판온도에서 더 좋은 결정성의 ZnO가 제작될 수 있다는 것으로 설명될 수 있다. Masuda 등은 ArF 엑시머 레이저 소스로 기판온도 450°C, 산소압력 3 mTorr에서 ZnO를 증착하여 제작한 TFT를 보고한 바 있다.<sup>8)</sup> ZnO를 활성 채널층으로 한 다른 TFT 소자는 Ohya 등이 sol-gel 법을 사용하여 제작된 바 있다.<sup>9)</sup> 한편, Kobayashi 등은 ZnO가 아닌 다른 TCO 인 GaN을 마그네트론 스퍼터링법으로 제작한 TFT를 보고한 바 있다.<sup>10)</sup> 현재까지 보고된 ZnO-TFT의 전계효과이동도가  $1\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$  이하에 머물고 있는데 비해, 본 연구에서 PLD 법으로 제작된 ZnO-TFT는  $2.4\sim 6.1\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$  로 월등히 우수한 전계효과이동도를 보였다. 또한 일부 시편을 제외한 대부분의 시편에서  $10^6$  수준의 on-off ratio를 보여주었다.

### 3. 결 론

KrF 펄스 레이저 증착법으로 산소분압 및 기판온도를 다양하게 변화시켜 제작된 ZnO 박막은 80% 이상의 우수한 광학 투명도와 c-축 배향 결정성을 보였으며, 박막 트랜지스터 소자의 활성 채널층으로 사용될 수 있음을 보였다. 본 연구에서 제작된 투명 ZnO-TFT는 펄스레이저 증착 공정 파라미터의 변화에 따라 2.4-6.1  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 전계효과이동도(field effect mobility)를 보였으며,  $10^2\sim 10^6$ 의 on-off ratio를 보였다. 본 연구에서 소개된 ZnO-TFT 중에서는 기판온도 300 $^\circ\text{C}$ , 산소압력 100 mTorr에서 제작된 시편이 가장 우수한 TFT 특성으로 그 전계효과이동도는 6.1  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , on-off ration은  $10^6$  수준이었다. 이러한 결과들을 고려하면, PLD 법으로 증착된 ZnO를 활성채널층으로 사용하는 TFT를 제작할 경우에는 산소압력이 200 mTorr 이하이고, 기판온도는 300 $^\circ\text{C}$  부근으로 할 경우, 가장 우수한 TFT 소자특성을 얻을 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Zafar, C.S. Ferekides, D.L. Morel, "Characterization and Analysis of ZnO:Al deposited by Reactive Magnetron Sputtering", J. Vac. Sci. Technol. Vol.A13, No.4, (1995) 2177-2182.
- [2] Dengyuan Song, Dirk-Holger Neuhaus, James Xia, Arimin G. Aberle, "Structure and Characteristics of ZnO:Al-nSi Heterojunctions prepared by Magnetron Sputtering", Thin Solid Films, Vol.422, (2002) 180-185.
- [3] Tamiko Ohshima, Tomoaki Ikegami, Kenji Ebihara, Jes Assmusen, Raj K. Thareja, "Synthesis of p-Type ZnO Thin Films using Co-doping Techniques based on KrF Excimer Laser Deposition", Thin Solid Films, Vol.435 (2003) 49-55.
- [4] D.M. Bagnall, Y.F. Chan, Z. Zhu, T. Yao, S. Koyama, M.Y. Shen, T. Goto, "Optically-pumped Lasing using ZnO at Room Temperature", Appl. Phys. Lett. Vol.70, No.17, (1997) 2230-2232.
- [5] L. Znaidi, G.J.A.A. Soler Illia, S. Benyahia, C. Sanchez, A.V. Kanaev, "Tailoring of Room Temperature Excitonic Luminescence in Sol-Gel Zinc-Oxide Silica Nanocomposite Films", Thin Solid Films, Vol. 441 (2003), 228-237.
- [6] S.J. Henley, M.N.R. Ashfold, D. Cherns, "The oriented Growth of ZnO Films on NaCl Substrate by Pulsed Laser Ablation", Thin Solid Films, Vol.422 (2002), 69-72.
- [7] K. Haga, T. Suzuki, Y. Kashiwaba, H. Watanabe, B. P. Zhang and Y. Segawa, "High-Quality ZnO Films prepared on Si Wafers by Low-Pressure MO-CVD", Thin Solid Films, Vol.433 (2003) 131-134.
- [8] Satoshi Masuda, Ken Kitamura, Yoshihiro Okumura, Shigehiro Miyatake, Hitoshi Tabata, Tomoji Kawai, "Transparent Thin Film Transistors using ZnO as an active Channel Layer and their electrical Properties", J. Appl. Phys., Vol.93, No.3, (2003) 1624-1630.
- [9] Yutaka Ohya, Tsukasa Niwa, Takauki Ban, Yasutaka Takahashi, "Thin Film Transistor of ZnO fabricated by Chemical Solution Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.40, (2001) 297-298.
- [10] S. Kobayashi, S. Nonomura, K. Abe, K. Ushikoshi, S. Nitta, "Preparation of Field Effect Transistor using Nano-Crystalline GaN", J. Non-Cryst. Solids, Vol. 227-230, (1998) 1245-1249.