2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20

펄스 레이저 증착법으로 제작한 ZnO를 채널층으로 한 박막트랜지스터

신백균*, 김창조*, 송진호**, 김소정***, 김종택****, 조재신****, 이백수****, Kenji Ebihara+
*인하대학교 전자전기공학부, *(주)세종기술, ***동해대학교 전기전자공학과, ****특허청, +日本 熊本大學

Thin film transistor with pulsed laser deposited ZnO active channel layer

P.K. Shin*, C.J. Kim*, J.H. Song**, S.J Kim***, J.T. Kim****, J.S. Cho****, B.S. Lee****, K. Ebihara+
*INHA Univ., **Sejong Tech. Ltd., ***DONGHAE Univ., ****KIPO, +Kumamoto Univ.

Abstract - KrF 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition: PLD)으로 ZnO 박막을 증착하여 평판 디스플레이 소자 구동용 박막 트랜지스터(thin film transistor) 소자를 제작하였다. 전도성이 높은 실리콘 웨이퍼(c-Si, 하부전극) 기판 위에 LPCVD 법으로 silicon nitride 박막을 절연막으로 형성하고, 다양한 공정 조건에서 펄스 레이저 증착법으로 제작한 ZnO 박막을 증착하여 채널층으로 하였으며, Al 박막을 증착하고 패터닝하여 소스 및 드레인 전극으로 하였다. ZnO 박막의 증착 시에 기판 온도를 다양하게 조절하고 산소 분압을 변화시켜 ZnO 박막의 특성을 조절하였다. 제작된 박막의 표면특성은 AFM(atomic force microscopy)로 분석하고, 결정특성은 XRD(X-ray diffraction)로 조사하였다. ZnO 박막의 전기적 특성은 Hall-van der Pauw 법으로 측정하였고, 광학 투과도(optical transparency)를 UV-visible photometer로 조사하였다. ZnO-TFT 소자는 10^6 수준의 on-off ratio와 2.4~6.1 $cm^2/V \cdot s$의 전계효과이동도(field effect mobility)를 보였다.

1. 서 론

최근 투명전도성산화막(TCO; transparent conductive oxide) 의 연구가 각광을 받고 있으며, 광전자 소자, 평판디스플레이소자 및 솔라셀 등에 응용되고 있다. TCO 중에서는 현재 ITO(indum-tin-oxide)가 그 응용분야에서 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 ITO는 화학적으로 불안정하고, 고가인 단점이 있으므로, ITO를 이러한 단점들을 대체하는 TCO의 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. ZnO는 이런 관점에서 가장 주목을 받는 물질이다.

ZnO 박막은 마그네트론 스퍼터링, 펄스레이저 증착법 ,MBE, sol-gel 법 등 다양한 공정기술로 제작될 수 있다. 이러한 ZnO 박막은 투명도가 우수하고 c-축 방향성을 보인다는 연구보고들이 있다. 또한, ZnO는 3.35eV의 넓은 다이렉트 밴드갭을 갖기 때문에, ZnO를 활성 채널층으로 하는 박막트랜지스터(TFT)를 제작하면 가시광의 노출에도 열화되지 않는 특성을 가질 수 있다. 반면에, 현재 실제 소자에 가장 많이 응용되고 있는 비정질 실리콘(a-Si) 및 다결정 실리콘(poly-Si) TFT는 active matrix 방식으로 평판디스플레이에 적용될 경우 가시광으로 인해 유도되는 광캐리어를 억제하기 위해 차단되어야 하는 단점이 있다. 더욱이, a-Si 및 poly-Si TFT의 불투명성으로 인해 디스플레이 픽셀의 밝기가 감소하기도 한다. ZnO-TFT는 이러한 단점을 극복하는 대안으로 보인다.

본 연구에서는, ZnO 박막을 펄스레이저 증착법으로 c-Si/Si_3N_4 상부에 증착하여 투명한 활성 채널층을 갖는 bottom-gate 형식 TFT 테스트 소자를 제작하였다. 증착된 ZnO 박막의 전기적, 광학적 및 구조적 특성을 조사하였으며, 펄스레이저 증착공정 파라메터가 TFT 소자의 기본특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 ZnO 박막 및 TFT 테스트 소자 제작

증착된 ZnO 박막의 광학 및 전기적 특성과 구조를 조사하기 위한 시편은 quartz glass 및 (100) p-type Si 기판을 사용하여 제작하였다. ZnO-TFT는 그림1에 나타낸 바와 같이 도핑된 c-Si를 기판 겸 하부전극으로, LPCVD 법으로 제작된 SiN을 절연층으로 하고, 그 위에 ZnO 박막을 증착한 후에, 진공 증착법으로 Al 소스/드레인 전극으로 제작하고, 포토리소그라피 공정으로 채널 간격이 40 또는 80 μm가 되도록 패터닝하였다.

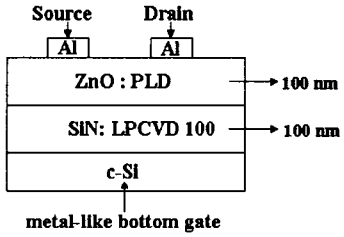

그림1 bottom-gate type ZnO-TFT 소자의 구조

시편 제작에 사용된 기판은 증착 전에 에타놀 및 아세톤으로 각각 5분간 초음파 세척으로 세정하였다. ZnO 박막은 그림 2에 개략적으로 나타낸 펄스레이저 증착장비를 사용하여 증착하였다. 진공 체임버를 5×10^{-5} Torr 진공도로 한 후, 99.9% 순도의 ZnO 타겟을 회전시키면서 KrF 레이저 빔(λ=248 nm, pulse duration 25 ns, 주파수 10 Hz, 레이저 에너지 200 mJ)을 조사하였다. ZnO 박막은 증착시 유입시킨 산소 분압을 5, 50, 100, 200 mTorr로 조절하고, 기판 온도를 100, 200, 300, 400℃로 조절하여 특성을 변화시켰다.

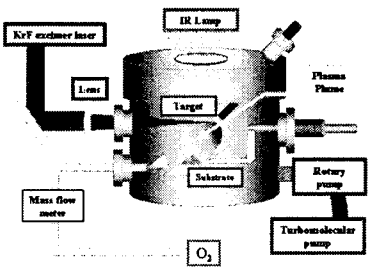

그림2 펄스레이저 증착장비의 개략도

2.2 ZnO 박막의 특성

증착된 ZnO 박막의 구조 및 표면특성은 XRD 및 AFM을 사용하여 조사하였으며, 광학 투명도(optical transmission)는 실온에서 UV-visible photometer를 사용하여 조사하였다. 전기적 특성은 Hall-van der Pauw 측정법으로 조사하였다.

산소압력 및 기판 온도를 변화시킨 ZnO 박막의 광학 투명도를 조사한 결과, 본 연구에서 제작된 ZnO 시편의 경우, 기판 온도에 관계없이 80% 이상의 광학투명도를 보였으며, 200 mTorr 산소압력에서 제작한 시편을 제외한 다른 시편은 모두 80% 이상의 광학투명도를 보였다. 따라서, 투명한 ZnO를 활성 채널층으로 하는 TFT 소자의 제작시에는 산소분압을 200 mTorr 이하로 조절하였다.

펄스레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막의 결정성을 XRD법으로 조사한 결과, 하나의 큰 피크(θ=34.5°(002) 방향성)와 또 다른 하나의 미약한 피크(2θ=72.5°(004) 방향성)를 관찰되었다. 따라서, 펄스레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막이 우수한 c-축 배향성을 가짐을 확인할 수 있었다. 공정 변수가 각기 다른 ZnO 박막간 c-축 배향성의 정확한 비교는 각 2θ=34.5°(002) 피크의 FWHM (full width half maximum)을 조사하여 수행하였다. 그 결과, 기판 온도가 높을 수록 ZnO 박막이 낮은 FWHM 값을 보였으며, 산소압력이 낮을수록 낮은 FWHM 값을 보였다. FWHM 값이 낮을수록 특정방향의 결정성이 더 우수함을 보이는 바, 펄스레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막의 결정성은 산소압력을 낮추고 기판온도를 높이면 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

AFM으로 ZnO 박막의 표면 거칠기(RMS[nm]) 및 결정립크기(grain size[nm]) 조사 결과는 다음과 같았다. 산소압력이 50 mTorr 이하에서는 표면거칠기 및 결정립크기가 감소한 반면, 그 이상에서는 다시 증가하였다. 기판온도 변화에 따른 영향은 표면거칠기 및 결정립크기에 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다.

산소압력 및 기판온도 변화에 따른 ZnO 박막의 전기전도도 변화 측정 결과는 다음과 같았다. ZnO 박막을 TFT의 활성 채널층에 사용하기 위해서는 낮은 전자 농도 즉, 높은 저항이 요구된다. PLD법으로 제작된 ZnO 박막의 저항값(Ωcm)은 산소압력에 관계없이 유사한 경향을 보인 반면, 기판 온도를 높일수록 증가하는 경향을 보였다. 그 결과가 그림3에 나와 있다.

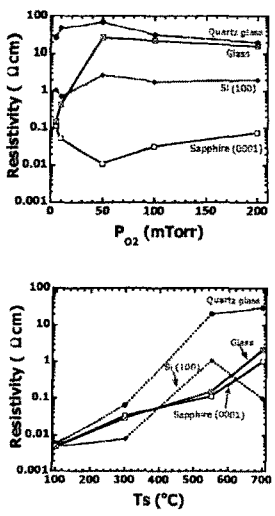

그림3 산소압력 및 기판온도 변화에 따른 ZnO 박막의 전기전도도 변화

위와 같은 결과들로 미루어 볼 때, TFT로 응용하기 위해 ZnO 박막을 펄스레이저 증착법으로 제작할 때에는 기판 온도를 300℃ 이상으로, 산소압력은 200 mTorr 이하로 하여야 함을 예상할 수 있다. 한편, 평판디스플레이에 제작되는 TFT는 450℃ 이하에서 열안정성을 갖는 유리기판 위에 제작되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 기판온도를 400℃ 이하로 하여 ZnO-TFT 시편을 제작하였다. 또한, 기판 온도를 낮추면 낮출수록 전체 제작단가를 낮출 수 있을 뿐만, 아니라, 고온에 의한 다른 부분의 열적 변화를 낮출 수 있다.

2.3 ZnO-TFT 소자의 특성

Masuda 등은 ArF 엑시머 레이저 소스로 기판온도 450℃, 산소압력 3 mTorr에서 ZnO를 증착하여 제작한 TFT를 보고한 바 있다.[1] ZnO를 활성 채널층으로 한 다른 TFT 소자는 Ohya 등이 sol-gel 법을 사용여 제작된 바 있다.[2] 한편, Kobayashi 등은 ZnO가 아닌 다른 TCO인 GaN을 마그네트론 스퍼터링법으로 제작한 TFT를 보고한 바 있다.[3]

본 연구에서는, TFT 소자의 가장 중요한 특성인 전계효과이동도(field effect mobility, μ_{FE}), 문턱전압(threshold voltage, V_{th}) 및 on-off ratio를 조사하기 위해, ZnO-TFT 시험소자를 HP4140B picoammeter를 사용하여 V_{sd}=1V 로 하고, 게이트 전압 V_g를 -10~30V로 변화시키는 측정을 수행하였다.

ZnO-TFT 소자는 depletion 모드에서 동작하였으며, V_{ds}가 1V일 때 TFT 특성을 나타냈다. ZnO 공정 시 산소압력 변화에 따른 TFT 특성 변화를 측정한 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 높을 수록 좋아지는 결과를 보였다. 이는 전절에서 기술한 바와 같이, 더 높은 기판온도에서 더 좋은 결정성의 ZnO가 제작될 수 있다는 것으로 설명될 수 있다. 현재까지 보고된 ZnO-TFT의 전계효과이동도가 1 cm^2/Vs 이하에 머물고 있는데 비해, 본 연구에서 PLD 법으로 제작된 ZnO-TFT는 2.4~6.1 $cm^2/V{\cdot}s$ 로 월등히 우수한 전계효과이동도를 보였다. 또한 일부 시편을 제외한 대부분의 시편에서 10^6 수준의 on-off ratio를 보여주었다. 그림4에 ZnO-TFT 소자특성의 한 예를 나타냈으며, 산소압력이 100 또는 200 mTorr 이고, 기판온도는 100℃에서 400℃로 100℃ 씩 변화시킨 ZnO 박막으로 제작한 TFT 소자의 I_{ds}-V_{gs} 특성곡선을 보여주고 있다.

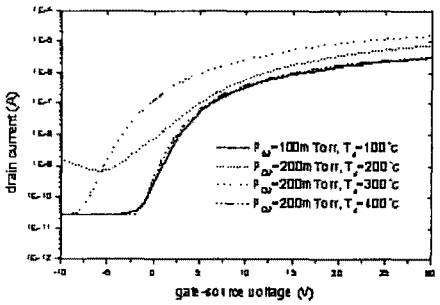

그림4 PLD 법으로 제작된 ZnO-TFT 소자의 전압-전류 특성

3. 결 론

펄스레이저 증착법으로 제작된 ZnO 박막은 80% 이상의 광학투명도를 보였으며, TFT 소자의 활성 채널층으로 사용될 수 있음을 보였다. ZnO-TFT는 펄스레이저 증착 공정 파라메터의 변화에 따라 2.4~6.1 $cm^2/V \cdot s$의 전계효과이동도(field effect mobility)를 보였으며, 10^2~10^6의 on-off ratio를 보였다. 본 연구에서 소개된 ZnO-TFT 중에서는 기판온도 300℃, 산소압력 100 mTorr에서 제작된 시편이 가장 우수한 TFT 특성으로 그 전계효과이동도는 6.1 $cm^2/V \cdot s$, on-off ration는 10^6 수준이었다. 이러한 결과들을 고려하면, PLD 법으로 증착된 ZnO를 활성채널층으로 사용하는 TFT를 제작할 경우에는 산소압력이 200 mTorr 이하이고, 기판온도는 300℃ 부근으로 할 경우, 가장 우수한 TFT 소자특성을 얻을 수 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Satoshi Masuda, Ken Kitamura, Yoshihiro Okumura, Shigehiro Miyatake, Hitoshi Tabata, Tomoji Kawai, J. Appl. Phys. 93, p.1624, 2003

[2] Yutaka Ohya, Tsukasa Niwa, Takauki Ban, Yasutaka Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys. 40, p.297, 2001

[3] S. Kobayashi, S. Nonomura, K. Abe, K. Ushikoshi, S. Nitta, J. Non-Cryst. Solids, 227-230, p.1245, 1998