

## RF Magnetron Sputtering으로 증착된 ZnO의 증착 특성과 이를 이용한 Thin Film Transistor 특성

김영웅\* · 최덕균

한양대학교 신소재 공학부

### Thin Film Transistor Characteristics with ZnO Channel Grown by RF Magnetron Sputtering

Young-Woong Kim\* and Duck-Kyun Choi

Dept. of Ceramic Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**초 록** : 플라스틱 기판에 적용이 가능한 최대 공정온도 270°C 이하에서 ZnO-TFT 소자를 제작하였다. ZnO-TFT 소자는 bottom gate 구조로 제작되었으며, ICP-CVD로 형성된 SiO<sub>2</sub> 산화물 게이트 공정을 제외하고는 모든 박막증착 공정은 RF-magnetron sputtering process를 이용하였다. ZnO 박막은 Ar과 O<sub>2</sub> gas 유량의 비율에 따라 여러 가지 조건에서 RF-magnetron sputtering 시스템을 이용하여 상온에서 증착하였다. Ar과 O<sub>2</sub> gas의 비율에 따라 제작된 TFT 소자는 모두 enhancement 모드의 소자특성을 나타내었고, 또한 가시광선영역에 있어 80% 이상의 높은 투과율을 보였다. ZnO 증착시 순수 Ar을 사용하여 제작된 ZnO-TFT의 경우에, 1.2 cm<sup>2</sup>/Vs의 field effect mobility, 8.5 V의 threshold voltage, 그리고 5×10<sup>5</sup>의 높은 on/off ratio, 1.86 V/decade의 swing voltage로 가장 우수한 전기적 특성을 보였다.

**Abstract**: Low temperature processed ZnO-TFTs on glass below 270°C for plastic substrate applications were fabricated and their electrical properties were investigated. Films in ZnO-TFTs with bottom gate configuration were made by RF magnetron sputtering system except for SiO<sub>2</sub> gate oxide deposited by ICP-CVD. ZnO channel films were grown on glass with various Ar and O<sub>2</sub> flow ratios. All of the fabricated ZnO-TFTs showed perfectly the enhancement mode operation, a high optical transmittance of above 80% in visible ranges of the spectrum. In the ZnO-TFTs with pure Ar process, the field effect mobility, threshold voltage, and on/off ratio were measured to be 1.2 cm<sup>2</sup>/Vs, 8.5 V, and 5×10<sup>5</sup>, respectively. These characteristic values are much higher than those of the ZnO-TFTs of which ZnO channel layers were processed with additional O<sub>2</sub> gas. In addition, ZnO-TFT with pure Ar process showed smaller swing voltage of 1.86V/decade compared to those with Ar+O<sub>2</sub> process.

**Key words**: ZnO, ZnO-TFTs, optical transmission, field effect mobility, SiO<sub>2</sub>

### 1. 서 론

ZnO는 비교적 넓은 3.36 eV의 밴드갭 에너지와 GaN (19 meV)에 비해 월등히 높은 60 meV의 여

가 결합 에너지를 가지고 있기 때문에 여러 가지 광학 소자의 핵심 재료로 그 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ZnO의 넓은 밴드갭으로 인한 투명성을 이용한 투명전극과 투명 박막

\*Corresponding author  
E-mail: duck@hanyang.ac.kr

트랜지스터, 높은 여기자 에너지를 이용한 p-n diode 및 laser diode 등의 p-n junction을 통한 효율 높은 레이저 제작에의 응용, 그리고 UV sensor, optical wave guide 등의 응용에 대한 연구가 주류를 이루어 왔다.<sup>1-4)</sup>

특히, 최근에는 디스플레이 분야의 급격한 성장과 더불어 ZnO를 이용한 투명 박막 트랜지스터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 투명 박막 트랜지스터는 현재 상용화되어 쓰이고 있는  $\alpha$ -Si based 박막 트랜지스터에 비하여 높은 전계 효과 이동도를 가지며, 가시광 영역에서의 높은 투과도, 그리고 빛에 의한 낮은 열화 등의 장점을 갖는다. 그리하여 빛 차단을 위해 사용되는 블랙 매트릭스의 제거와 트랜지스터 자체의 투명성을 이용한 고효율의 디스플레이 구현을 가능케 한다. 또한, 상온에서 다결정으로 증착이 되기 때문에 플라스틱과 같이 변형성이 심한 기판에 응용될 수 있으므로 차세대 박막 트랜지스터의 채널로서 각광받고 있다. 진성 ZnO는 침입형 Zn와 산소 vacancy 때문에  $10^{17}\sim 10^{20}/\text{cm}^3$  정도의 캐리어 농도를 갖는 n-type 물질이며, 증착 단계 혹은 후처리를 통해 원하는 응용분야에 맞게 캐리어 농도를 조절할 수 있다. 박막 트랜지스터로의 응용에 있어 n-type을 갖는 ZnO는 채널의 이동도를 높여주기 위하여 최대한 백그라운드 전자의 캐리어 농도를 낮추어 주어야 한다.<sup>1)</sup> 따라서 이를 위해 증착 단계에서 챔버의 압력을 조절하거나 산소를 유입해 주기도 하며, 플라즈마 처리, 급속 열처리 등과 같은 적절한 후처리를 통하여서도, 침입형 Zn를 줄임으로서 캐리어 농도를 낮출 수 있게 되어 박막 트랜지스터로의 응용이 가능하다.<sup>5-7)</sup> 하지만, ZnO 박막을 이용한 투명 박막 트랜지스터는 아직 몇 가지 문제점을 안고 있다. 지금까지 보고된 대부분의 결과들은 ZnO가 다결정임에도 불구하고 수  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  정도의 비교적 낮은 이동도를 가지며 낮은 on/off ratio와 부적절한 threshold voltage 등의 문제점들을 가질 뿐만 아니라 여러 가지 특성을 고루 만족시키며 실제 사용가능한 고성능의 디바이스가 아직 구현되지 않고 있다.

본 연구에서는 높은 투과도, 빠른 이동도, 높은 on/off ratio 등의 특성을 지닌 고성능 ZnO 투명 박막 트랜지스터의 제작에 있어 가장 중요한 channel layer인 ZnO film을 RF magnetron sputtering을 이

용하여 상온에서 증착하였다. 백그라운드 전자의 캐리어 농도를 최대한 낮추어 채널의 이동도를 높이기 위하여 ZnO 박막의 증착 조건으로 Ar:O<sub>2</sub> 비율을 20:0에서 16:4까지 조절하여 증착된 각각의 film에 대하여 구조적, 전기적 특성을 조사하였다. 또한, Ar:O<sub>2</sub> 비율에 따라 증착된 ZnO 박막을 이용하여 ZnO 투명박막 트랜지스터를 제작하여 Ar:O<sub>2</sub> 비율이 디바이스의 전기적, 광학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 실험방법

그림 1은 ZnO 박막을 이용한 투명 박막 트랜지스터의 개략도이다. ZnO 투명박막 트랜지스터는 그림과 같은 구조로 Corning1737 유리기판 위에 제작되었다. (a)는 제작된 트랜지스터의 Schematic이며, (b)는 위에서 바라본 평면도를 나타낸 것이다. 모든 층들은 80% 이상의 높은 투명도를 가진 박막들이 사용되었으며, 공정온도는 최대 270°C 이내로 제한되었다. SiO<sub>2</sub>층을 제외한 모든 층은 RF 마그네트론 스퍼터링을 사용하여 상온에서 제작되었다.

디바이스 제작을 위해 먼저, 하부 게이트로 사용될 ITO층을 RF magnetron sputter을 이용하여 상온에서 100nm의 두께로 유리기판위에 증착하였다. 그리고 게이트 절연층으로 사용될 SiO<sub>2</sub>는 ITO 게이트 전극 위에 100nm 두께로 inductively coupled plasma-chemical vapor deposition (ICP-CVD)를 이용하여 270°C의 조건에서 증착하였다. 그 후, 채널막인 ZnO 박막을 RF magnetron sputter로 상온에서 100nm 두께로 증착하였다. ZnO의 증착 조건은 RF 파워 (13.56 MHz) 60W, 공정 압력

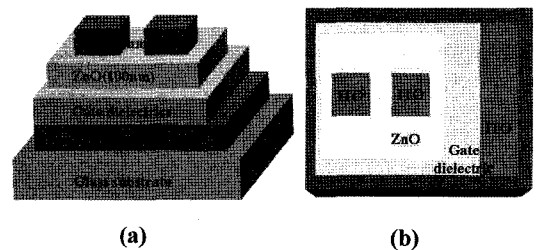


Fig. 1. Schematic diagram of the bottom-gate type ZnO-TFT. (a) Cross section and (b) top view.

은 20 mTorr로 고정하고, Ar:O<sub>2</sub> 가스비는 20:0, 18:2, 16:4의 조건에서 각각 증착하였다. 마지막으로 negative-photoresist (N-PR)를 사용하여 소스와 드레인 영역을 패터닝 한 후, ITO로 상부 전극을 100nm 증착하여 lift-off 공정을 통하여 ZnO 투명 박막 트랜지스터를 제작하였다.

Ar:O<sub>2</sub>의 비율에 따라서 제작된 ZnO 박막의 샘플은 X-ray Diffraction (XRD), Field emission-Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), Hall measurement로 결정성, 표면형상, 캐리어 농도 등의 특성을 각각 분석하였다. 또한, 제작된 ZnO 투명 박막 트랜지스터는 semiconductor parameter analyzer (HP4155A)를 이용하여 전기적 특성을 평가하였으며, 완성된 소자의 투과도 분석을 위하여 UV-VIS를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 Ar:O<sub>2</sub>의 비율에 따라 증착된 ZnO 박막의 XRD 결과이다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 모

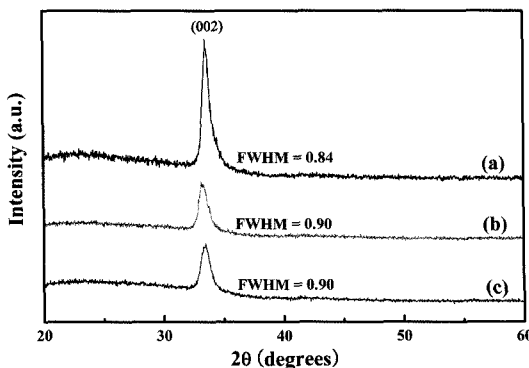


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of ZnO films with various gas flow rates, (a) Ar:O<sub>2</sub>=20:0, (b) Ar:O<sub>2</sub>=18:2, and (c) Ar:O<sub>2</sub>=16:4, respectively.

든 ZnO 박막은 가스비에 무관하게 (002) 피크가 강하게 나타나며, c-축으로 우선 배열되고 hexagonal 구조가 형성되었음을 확인하였다. (002) 피크의 위치는 Ar:O<sub>2</sub>의 비율에 따라 약 34도를 기준으로 큰 차이는 없었으나, 산소함량이 증가함에 따라 반가폭 (Full width half maximum, FWHM)은 커지며 결정성이 감소하는 경향을 보였다. FE-SEM을 이용하여 관찰된 ZnO 박막의 표면형상은 증착시 Ar:O<sub>2</sub>의 비율에 따라 그림 3과 같은 형상을 나타내었다. 순수 아르곤 20 mTorr의 분위기에서 증착된 ZnO의 경우 다른 샘플들에 비하여 큰 grain들이 형성되었으며, 산소의 비율이 증가할수록 grain size는 급격하게 작아지는 경향을 보였다.

표 1은 Ar:O<sub>2</sub>의 비율에 따라서 증착된 ZnO 박막의 캐리어로서의 Hall 측정 결과를 나타낸 표이다. 본 실험의 모든 샘플은 10<sup>12</sup>~10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> 사이의 캐리어 농도와 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> Ωcm 사이의 resistivity 값을 가진 n-type형 캐리어 특성을 보였다. 일반적으로 ZnO의 증착 시에 높은 비저항과 낮은 캐리어 농도를 가지게 하기 위하여 산소를 유입하지만, ZnO를 증착함에 있어 산소를 주입했음에도 불구하고 증착조건에 따라서 캐리어 특성에는 별다른 차이점이 나타나지 않았다. Y. S. No 등에 의하면 850°C의 고온에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막 위에 ZnO 증착 시에는 이와 다른 경향을 보이는데, O<sub>2</sub>/Ar+O<sub>2</sub>의 유량비가 증가할수록 grain size도 증가하며 그 비가 0.5 일때 가장 큰 grain size를 가지고, 그 보다 높은 유량비에서는 grain size가 다시 줄어드는 경향을 보였다.<sup>8)</sup> 그러나 본 연구에서는 O<sub>2</sub>/Ar+O<sub>2</sub>의 유량비가 증가할수록 오히려 grain size는 급격하게 감소하였는데, 이는 상온과 고온에서의 가스의 화학적 결합력의 차이와 ZnO 아래의 막이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 차이에서 발생한 것으로 판단된다. 또, O<sub>2</sub>/Ar+O<sub>2</sub>의 유량비가 증가할수록 산소 vacancy가 사라지면서 ZnO의 resistivity는 증가한다고 보고하였으며,<sup>8)</sup> 이번 연구의 결과도 이와 일치한다.

Table 1. Summarized electrical properties of ZnO films by Hall measurement

Ar:O <sub>2</sub> Ratio (sccm)	Carrier Concentration (cm <sup>-3</sup> )	Hall mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	Resistivity (Ωcm)	Carrier Type
20:0	10 <sup>12</sup>	1~5	10 <sup>5</sup>	n
18:2	10 <sup>13</sup> ~10 <sup>14</sup>	1.25	10~10 <sup>3</sup>	n
16:4	10 <sup>12</sup>	0.45	10 <sup>6</sup>	n

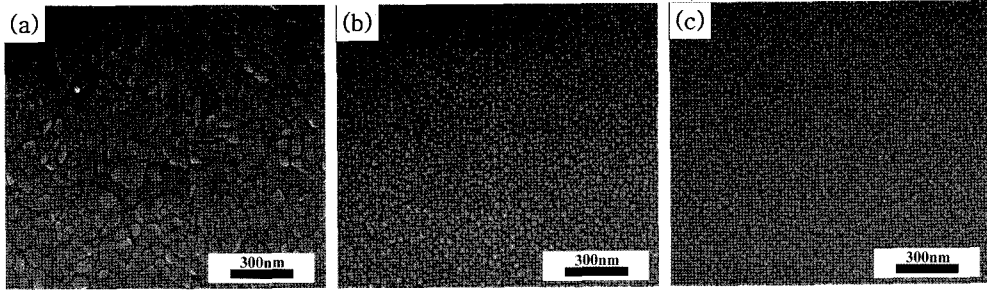


Fig. 3. SEM images of the as-deposited ZnO thin films deposited with the flow rates of (a) Ar:O<sub>2</sub>=20:0, (b) Ar:O<sub>2</sub>=18:2, and (c) Ar:O<sub>2</sub>=16:4, respectively.

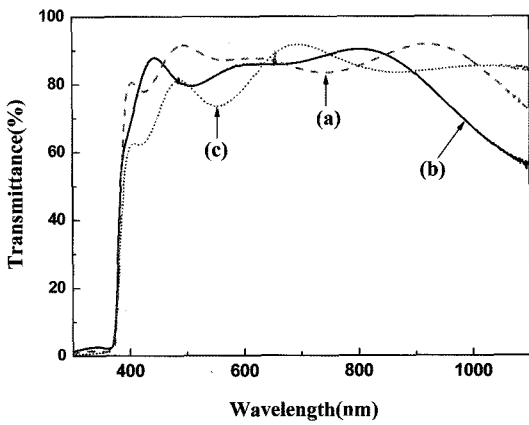


Fig. 4. Transmittance of the fabricated ZnO TFTs with a various gas flow rate. (a) Ar:O<sub>2</sub>=20:0, (b) Ar:O<sub>2</sub>=18:2, and (c) Ar:O<sub>2</sub>=16:4.

Ar:O<sub>2</sub>의 유량비에 따라서 증착된 세 가지 ZnO 박막을 이용하여 제작한 트랜지스터는 그림 1과 같은 구조이며, 전기적 특성은 채널 폭과 길이가 각각 50 μm, 20 μm인 트랜지스터에서 측정하였다. 그림 4는 제작된 세 가지 디바이스의 투과도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 가시광 영역의 파장대 (400-700nm)에서 모든 조건의 디바이스들이 80% 이상의 높은 투과도를 나타내었다. 이는 제작과정에 사용된 모든 물질들이 높은 투과도를 가진 물질들이고, ZnO 증착 시 적은 양의 산소의 주입으로 인하여 투과도를 저하시키는 요인이 없었기 때문이라고 할수 있다.

그림 5는 순수 아르곤 분위기(Ar:O<sub>2</sub>=20:0)에서 증착된 ZnO 박막을 이용하여 제작한 투명 박막 트랜지스터의 특성을 나타낸 것으로, (a)는 전이특성

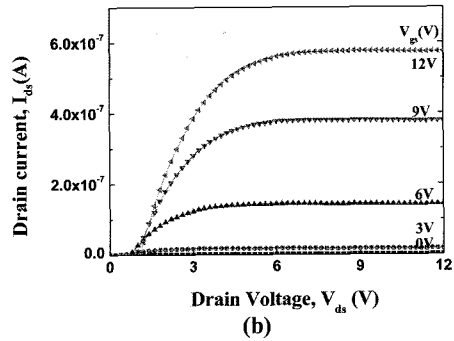
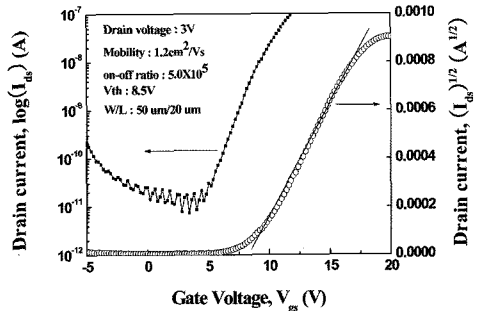


Fig. 5. Device characteristics of ZnO TFTs deposited with pure Ar ambient. (a) Transfer characteristics ( $I_{ds}$ - $V_{gs}$ ) at  $V_{ds} = 3$  V (b) The drain current with variation of gate voltages.

(b)는 출력특성을 나타낸 그래프이다. 그림 5(a) 그래프에는 드레인 전압을 3V로 고정하고, 게이트 전압을 -5 V에서 20 V까지 인가하면서 박막 트랜지스터의 전이 특성을 측정한 결과이다. on/off ratio는 약  $5 \times 10^5$  정도의 높은 값을 보였으며,  $V_{gs}$ - $(I_{ds})^{1/2}$ 의 그래프로부터 얻어진 문턱전압 ( $V_{th}$ )은

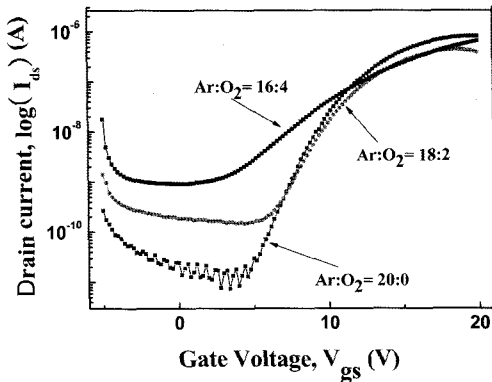


Fig. 6.  $I_{ds}$ - $V_{gs}$  characteristics of TFTs with ZnO channel layers deposited with various Ar:O<sub>2</sub> gas flow rates. Drain voltage - Drain current with variation of gate voltages from ZnO-TFTs with W/L = 50  $\mu$ m/20  $\mu$ m. Drain bias was applied 3 V.

8.5 V이었다. 전계효과 이동도 ( $\mu_{FE}$ )는 식 (1)의 표준 선형영역의 전이특성 관계식으로부터 얻어진 transconductance ( $g_m$ )를 이용하여 계산하였다.

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = \mu_{FE} C_{OX} \frac{W}{L} V_{ds} \quad (1)$$

여기서,  $C_{ox}$ 는 게이트 절연막의 단위면적당 capacitance이며,  $V_{ds}$ 는 드레인 전압, 그리고 W/L은 채널의 폭/길이를 각각 나타낸다. 선형구간에서 분석된 50  $\mu$ m / 20  $\mu$ m의 폭과 길이를 갖는 트랜지스터의 전계효과이동도는 1.2 cm<sup>2</sup>/Vs의 값을 보였으며, swing voltage는 1.86 V/decade였다. 그림 5(b)는 게이트 전압을 3 V 간격으로 인가하면서 드레인 전압과 드레인 전류의 관계 ( $V_{ds}$  vs.  $I_{ds}$ )를 나타낸 그래프이다. 게이트 전압이 0 V로 전혀 인가되지 않았을 때 10<sup>-10</sup> A 이하의 드레인 전류값을 보였으며, 이는 normally off 상태의 증식형 (enhancement mode)으로 동작되고 있음을 보여주는 결과이다. 또한 채널 영역의 반전에 따라서 강한 포화

가 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 Ar:O<sub>2</sub>의 유량 비율에 따라 제작된 ZnO 투명박막 트랜지스터의 전이특성 그래프를 비교하여 나타낸 그림이다. 순수 Ar 분위기에서 제작된 ZnO 박막트랜지스터에 비하여 산소 유량이 증가할수록 트랜지스터 소자의 특성은 현격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 표 2에 Ar:O<sub>2</sub>의 유량비에 따른 박막트랜지스터의 전기적 특성을 정리하였다. Ar:O<sub>2</sub>=16:4의 경우, off current는 10<sup>-8</sup> 수준으로 Ar:O<sub>2</sub>=20:0의 경우에 비하여 3 order 이상 낮은 값을 보이며, 전계효과이동도도 1/2배 수준으로 현격하게 감소하였다. 또한 on/off ratio도 10<sup>3</sup>으로 낮은 값을 보였다. 이는 가스 유량비에 따라서 grain size도 영향을 많이 받는다고 분석한 XRD와 SEM의 분석결과에서 보듯이, grain size의 감소가 전기적 특성에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이는 ZnO 증착 시 산소의 양이 많아질수록 mobile carrier의 grain boundary trap이 많아지면서 전계효과이동도가 작아진다는 결과와 일치한다.<sup>9)</sup> 또한, ZnO 증착 시 산소의 양이 많아질수록 박막이 stoichiometric해지고 산소 공공이 줄어들어온다는 보고와도 관련 있다.<sup>8)</sup> ZnO는 결정구조에서 유래한 산소 vacancy이나 침입형 Zn이 결합이 되어 도너(donor)로 작용하면서 n형 반도체 특성을 보인다. 산소 vacancy의 경우 산소 vacancy의 위치에서는 Zn<sup>2+</sup>가 전자 2개를 내놓고 산소와 결합해야 하나 결합할 산소가 없으므로 전자 2개는 자유롭게 이동하게 된다. 이 경우 결합방정식은  $O = V_o^x + 1/2O_2$ ,  $V_o^x = V_o^+ + e^-$ ,  $V_o^+ = V_o^{2+} + e^-$ 로 표시된다. 이때  $V_o^+$ 는 중성이지만, 두 개의 전자가 산소 vacancy에 포획되고 이 전자가 vacancy로부터 탈출하여 자유롭게 이동하게 한다.<sup>10,11)</sup> 따라서 산소 vacancy가 도너로 작용하는 메카니즘이다. 따라서, 산소의 양이 많아질수록 산소 vacancy가 줄어들게 되고, 이는 곧 ZnO에서 도너의 감소로 나타나 전계효과이동도가 감소하는 원인이라고 판단된다.

Table 2. Summarized I-V characteristics from various ZnO-TFTs

Ar:O <sub>2</sub> Ratio (sccm)	On/off ratio	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	Swing voltage (V/decade)	Threshold voltage (V)
20:0	5.0×10 <sup>5</sup>	1.2	1.86	8.5
18:2	10 <sup>4</sup>	0.8	1.90	3
16:4	10 <sup>3</sup>	0.6	4.98	2

마지막으로 ITO기판과 ZnO 사이의 계면특성에 의한 원인을 들 수 있다. Elvira<sup>1,12)</sup> 등에 의하면, sidewall effect는 소스-드레인의 resistivity와 fringing 전계효과와 관련이 있으며, current는 디바이스의 edge 아래 측, ZnO와 게이트전극의 계면에서 흐르는데, 이는 채널의 형태와도 관련이 많다고 하였다. 따라서 본 연구에서의 ZnO의 증착 시 산소의 유입은 ITO 박막의 산화를 일으킬 수 있는 큰 요인이며, 이로 인하여 산소의 양이 많아질수록 ZnO와 ITO 게이트 전극 사이의 계면특성이 나빠져서 디바이스의 전기적 특성이 저하되었다고 판단된다.

#### 4. 결 론

RF magnetron sputter로 ZnO 채널 증착 시 Ar과 O<sub>2</sub> gas의 유량 비율에 따라서 서로 다른 3종류의 ZnO를 증착했으며, ZnO 투명박막 트랜지스터 소자를 bottom gate 구조로 제작하여 전기적 특성을 조사하였다. Ar과 O<sub>2</sub> gas의 비율에 따라 제작된 박막 트랜지스터는 모두 enhancement 모드의 소자특성을 나타내었고, 또한 가시광선영역에서 80% 이상의 높은 투과율을 보였다. ZnO 증착 시 Ar만을 사용하여 제작된 ZnO 투명 박막 트랜지스터의 경우에 가장 좋은 전기적 특성을 보였는데, 1.2 cm<sup>2</sup>/Vs의 field effect mobility, 8.5 V의 threshold voltage, 그리고 5×10<sup>5</sup>의 높은 on/off ratio의 전기적 특성을 보였다. 또한 1.86 V/decade를 보인 swing voltage에서도 ZnO 증착 시에 O<sub>2</sub>가 조금이라도 들어간 조건에서 제작된 ZnO-TFT의 특성보다 나은 전기적 특성을 보였다. 결국 ZnO 증착시 O<sub>2</sub> gas 양이 많아질수록 ZnO 투명박막 트랜지스터의 전기적 특성이 저하되는 현상이 나타나는데, 이는 grain size의 감소, 산소 vacancy의 감소로 인한 carrier 농도의 감소, ZnO와 ITO 게이트 전극의 계면

상태의 열화가 원인이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 자기조직 소재공정 우수연구센터 육성사업(grant number: R11-2005-048-00000-0) 및 학술진흥재단의 중점연구소사업(KRF-2006-005-J04103)의 지원으로 수행되었다.

#### 참고문헌

1. E. M. C. Fortunato, P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Goncalves, A. J. S. Marques, L. M. N. Pereira, and R. F. P. Martins, *Adv. Mater.* 17, 590 (2005).
2. B. Liu, Z. Fu, and Y. Zia, *Appl. Phys. Lett.* 79, 943 (2001).
3. M. H. Lim, K. T. Kang, H. G. Kim, I. D. Kim, Y. W. Choi, and H. L. Tuller, *Appl. Phys. Lett.* 89, 202908 (2006).
4. K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, and J. A. Voigt, *Appl. Phys. Lett.* 68, 403 (1996).
5. S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, H. Tabata, and T. Kawai, *J. Appl. Phys.* 93, 1624 (2003).
6. R. L. Hoffman, *J. Appl. Phys.* 95, 5813 (2004).
7. Q. J. Li and D. J. Li, *J. Non-Cryst. Sol.* 351, 3191 (2005).
8. Y. S. No, T. W. Kim, Y. S. Jung, and W. K. Choi, *Appl. Surf. Sci.* 252, 8121 (2006).
9. R. L. Hoffman, B. J. Norris and J. F. Wager, *Appl. Phys. Lett.* 82, 733 (2003).
10. K. L. Chopra, S. Major, and K. K. Pandya, *Thin Solid Films*, 102, 1 (1983).
11. C. M. Lampert, *Sol. Energy Mater.* 6, 1 (1981).
12. E. M. C. Fortunato, P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Goncalves, A. J. S. Marques, R. F. P. Martins, and L. M. M. Pereira, *Appl. Phys. Lett.* 85, 2541 (2004).