

# rf 마그네트론 스퍼터링으로 증착한 Mg-doped Zinc Tin Oxide막의 특성에 미치는 산소의 영향

박기철<sup>1</sup>, 마대영<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 경상대학교 반도체공학과 및 공학연구원

<sup>2</sup> 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

## Effects of Oxygen on the Properties of Mg-doped Zinc Tin Oxide Films Prepared by rf Magnetron Sputtering

Ki Cheol Park<sup>1</sup> and Tae Young Ma<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Semiconductor Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

(Received April 17, 2013; Revised May 1, 2013; Accepted May 3, 2013)

**Abstract:** Mg-doped zinc tin oxide (ZTO:Mg) thin films were prepared on glasses by rf magnetron sputtering. O<sub>2</sub> was introduced into the chamber during the sputtering. The optical properties of the films as a function of oxygen flow rate were studied. The crystal structure, elementary properties, and depth profiles of the films were investigated by X-ray diffraction (XRD), x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and secondary ion mass spectrometry (SIMS), respectively. Bottom-gate transparent thin film transistors were fabricated on N<sup>+</sup> Si wafers, and the variation of mobility, threshold voltage etc. with the oxygen flow rate were observed.

**Keywords:** Transparent thin film transistors, Zinc tin oxide, XPS, Optical transmittance, Energy band gap

### 1. 서 론

인듐 (In), 주석 (Sn), 갈륨 (Ga) 등을 혼합한 ZnO 기반 비정질투명박막의 개발과 함께 평판 디스플레이용 투명박막트랜지스터 (transparent thin film transistors, TTFT)에 대한 연구는 새로운 전기를 맞고 있다 [1,2].

In, Sn 및 Ga이 ZnO와 합금이 되면 비정질임에도 불구하고 높은 전자이동도를 갖는 박막이 만들어진다. 이것은 Zn, In, Sn, Ga 원자의 최외각에 존재하는 4s 또는 5s 양자궤도들이 중첩됨으로써 박막의 결정구조에 영향을 받지 않는 전자의 이동경로가 만들어지기 때문이다 [3]. 또한 비정질박막에는 입계 (grain boundary)가 존재하지 않는 까닭에 전자의 이동시 입계에 의한 산란 (scattering)이 감소하며 이것은 비정질 TTFT의 이동도를 향상시키는 또 다른 요인이 된다. TTFT의 활성층으로 사용되는 ZnO 기반 비정질 박막 중에서 Sn을 첨가한 ZTO (zinc tin oxide)가 높은 이동도 및 높은 에너지밴드갭에 의해 각광받고 있다 [4-6].

a. Corresponding author: tyma@gnu.ac.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ZnO 기반의 박막은 높은 이동도를 갖는 비정질 투명박막을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 금속원자를 첨가하여 에너지밴드갭을 증가 [7]시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 에너지밴드갭이 크면 이동도가 낮아질 수 있으나, 광의 통과대역이 넓어지고 열적 안정성이 높아진다.

본 연구에서는 마그네슘(Mg)을 첨가하여 ZTO막(ZTO:Mg막)의 에너지밴드갭을 증가시켰다. 약 5.0 at%의 Mg를 함유한 ZTO 타겟을 rf 마그네트론 스퍼터링하여 ZTO:Mg막을 증착하였다. 스퍼터링 시 아르곤과 함께 산소를 주입하였으며, 산소 유량 (flow rate)에 따른 ZTO:Mg막의 구조적, 광학적 및 원자결합 특성을 조사하였다. 또한 디스플레이 구동소자로서의 가능성을 조사하기 위해 ZTO:Mg TTFT를 제조하고 그 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

유리기판 위에 ZnO:Mg막을 rf 마그네트론 스퍼터링으로 증착하였다. Zn:Sn:Mg의 원자비를 53:42:5로 하여 섞은 ZnO, SnO<sub>2</sub> 및 MgO분말을 성형하여 스퍼터링 타겟으로 사용하였다. 스퍼터링 시 챔버의 압력은 5 mtorr였으며 고주파전력은 90 W였다. ZTO:Mg 박막의 투과도를 높이기 위해 아르곤과 함께 산소를 주입하여 방전시켰다. 산소의 분압은 아르곤과 산소의 유량으로 조절하였으며 별도로 산소분압을 측정하지는 않았다. 아르곤의 유량은 50 sccm으로 고정시켰으며, 산소는 0, 10 및 20 sccm으로 변화시켰다.

분광광도계(250 nm~700 nm)를 사용하여 ZnO:Mg박막의 광투과도를 측정한 후 에너지 밴드 갭과 Urbach energy를 구하였다. X선회절분석기로 막의 결정구조를 관찰하였으며, XPS와 SIMS를 사용하여 원자결합 및 분포를 조사하였다.

저항이 매우 낮은 N<sup>+</sup> 실리콘웨이퍼를 게이트전극으로 사용하여 bottom-gate 구조의 TTFT를 제조하였다 [그림 1 참조]. 우선 실리콘웨이퍼를 습식 산화시켜 ~100 nm의 SiO<sub>2</sub>를 기른 후 그 위에 ~50 nm 두께의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 ALD (atomic layer deposition)로 증착하였다. 게이트절연층의 역할을 할 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 다층막 위에 ZTO:Mg막을 rf 마그네트론 스퍼터링하여 TTFT의 활성층으로 사용하였다. 증착한 ZTO:Mg막을 대기압에서 30분 동안 400°C로 열처리한 후 그 위에 ~600 nm의 인듐을 진공 증착하여 소스 및 드레인

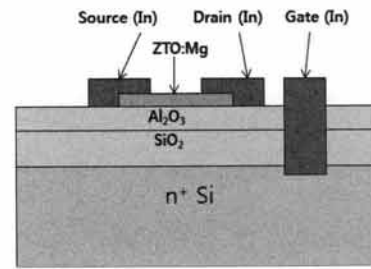


Fig. 1. Schematic diagram of bottom-gate TTFT.

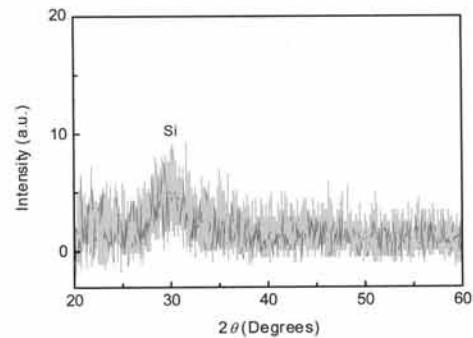


Fig. 2. XRD pattern of ZTO:Mg film sputtered at O<sub>2</sub>/Ar= 0.

전극을 형성하였다. 금속마스크로 패터닝한 TTFT의 채널 너비 및 길이는 모두 400 μm였다. Semiconductor parameter analyzer(Keithley 4200)로 TTFT의 전달 특성 (I<sub>DS</sub>-V<sub>GS</sub>)을 측정하였으며, 그 결과로부터 문턱전압(V<sub>T</sub>), 이동도(μ), 동작전류 대 차단전류 비 (I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub>)를 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 산소유량에 따른 ZTO:Mg박막의 특성

~1.0 μm의 SiO<sub>2</sub>가 입혀진 실리콘 웨이퍼 위에 ZTO:Mg막을 ~100 nm 정도 증착한 후 XRD 측정을 하였다. 순수 아르곤으로 스퍼터링한 ZTO:Mg막의 XRD 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 관측되는 2θ= 30° 부근의 넓은 피크는 실리콘 웨이퍼에 의한 것이며, 전체적인 XRD 패턴으로 볼 때 측정된 ZTO:Mg막은 비정질인 것으로 사료된다. 산소를 첨가하면서 스퍼터링한 ZTO:Mg막들도 그림 2와 유사한 XRD 패턴을 나타내었다.

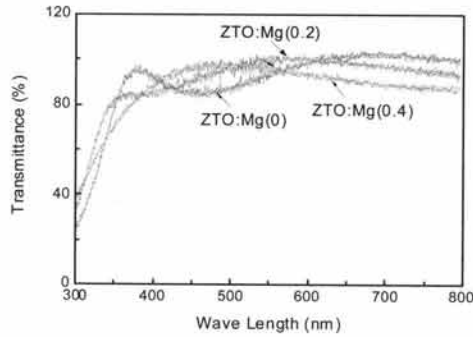


Fig. 3. Optical transmittance of ZTO:Mg films. The meaning of ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) and ZTO:Mg(0.4) is that ZTO:Mg film sputtered at  $O_2/Ar=0$ ,  $O_2/Ar=0.2$  and  $O_2/Ar=0.4$ , respectively.

그림 3은 ZTO:Mg막의 산소유량에 따른 광투과도 변화를 나타낸 것이다. 그림 3에서 ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)는 스퍼터링 시 산소와 아르곤의 유량 비가 각각 0, 0.2 및 0.4였음을 의미한다. 본 논문에서는 위의 표기법을 사용하여 ZTO:Mg막의 증착 조건을 구별하고자 한다. 본 실험에서 측정된 모든 ZTO:Mg막은 가시광 영역에서 80%이상의 투과율을 보였다. 직접 재결합을 하는 ZTO:Mg막의 광흡수계수( $\alpha$ )는, 광에너지( $h\nu$ )가 에너지밴드갭( $E_G$ )보다 높은 Tauc 영역에서, 광에너지와 아래의 관계를 갖는다 [8].

$$\alpha h\nu \propto (h\nu - E_G)^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 Planck 상수,  $\nu$ 는 주파수이다. 따라서 식 (1)을 통하여 ZTO:Mg막의  $E_G$ 를 구할 수 있다. 그림 4는  $E_G$ 를 구하기 위해 변환한 광에너지와  $(\alpha h\nu)^2$ 의 그래프이다. 광흡수계수는 그림 3의 광투과율로부터 계산하였다. Tauc 영역의 직선그래프와 x축이 만나는 점을  $E_G$ 로 정의하였다. ZTO:Mg(0)의  $E_G$ 는 3.68 eV였다. 스퍼터링 타겟에 5.0 at%의 Mg를 첨가함에 따라 ZTO막의  $E_G$ (3.53 eV)가 약 0.15 eV 증가하였다. 스퍼터링시 산소를 첨가한 ZTO:Mg(0.2)의 경우  $E_G$ 가 3.80 eV로 ZTO:Mg(0)에 비해 0.12 eV 더 커졌다. 이것은 산소의 첨가에 따라 ZTO:Mg막의 화학양론성이 향상되었기 때문일 것이다. 그러나 ZTO:Mg(0.4)는  $E_G$ 가 3.75 eV로 다시 감소하였다. 스퍼터링 시 주입되는 산소의 양이 너무 많으면 에너지

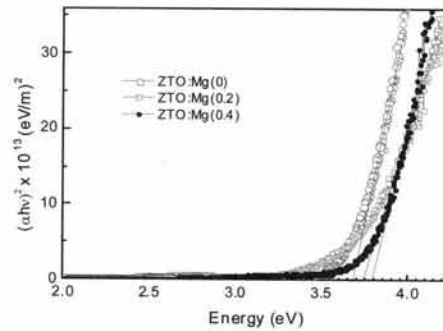


Fig. 4. Plot of  $(\alpha h\nu)^2$  as a function of  $h\nu$  for ZTO:Mg films. Energy band gaps were obtained from the plot.

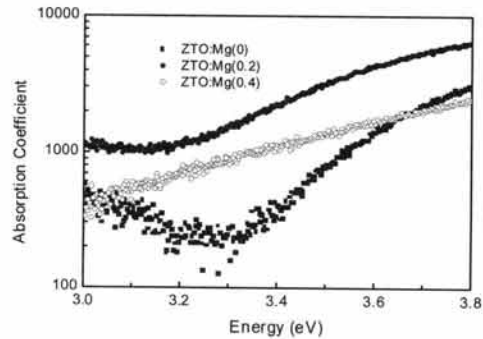


Fig. 5. Plot of  $\log(\alpha)$  as a function of  $h\nu$  for ZTO:Mg films. The Urbach energies were obtained from the slopes of the linear region in the graph.

밴드갭 가장자리 부근의 상태 밀도 (state density)가 증가하여 에너지밴드갭이 감소하는 것으로 생각된다. 에너지밴드갭 가장자리 아래의 상태 밀도가 높은 영역을 Urbach 영역이라고 하며, Urbach 영역의 광흡수계수는 광에너지에 지수적으로 비례한다 [9].

$$\alpha \propto \exp\left(\frac{h\nu}{E_U}\right) \quad (2)$$

여기서  $E_U$ 는 Urbach tail 에너지이다.  $E_U$ 의 크기는 Urbach 영역의 상태 밀도와 연관이 있으며, 박막에 결함이 많을수록  $E_U$ 가 증가한다.

그림 5는  $E_U$ 를 구하기 위해 광흡수계수와 광에너지의 관계를 세미로그 그래프에 나타낸 것이다. 그림 5에서  $E_U$ 는 직선기울기의 역수이며, 이렇게 구한 ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)의  $E_U$ 는 각각 0.50 V, 0.75 V 및 1.05 V였다. 스퍼터링 시 첨

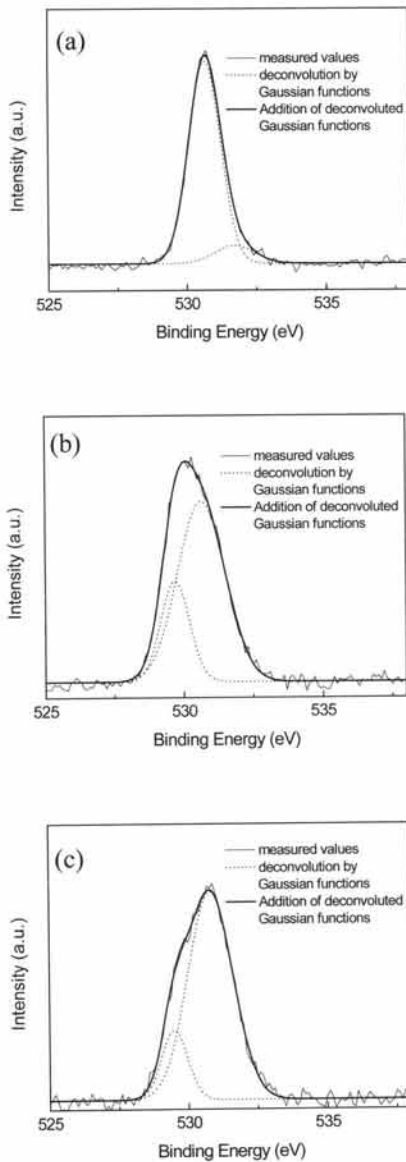


Fig. 6. O 1s peaks of: (a) ZTO:Mg(0), (b) ZTO:Mg(0.2), and ZTO:Mg(0.4). The peaks were deconvoluted by Gaussian function.

가된 산소는 ZTO:Mg막의 상태 밀도를 증가시킨다는 것을  $E_U$ 로부터 알 수 있었다.

산소유량에 따른 ZTO:Mg막의 원자결합 변화를 조사하기 위하여 XPS 측정을 실시하였다. 산소유량에 따른 원소 피크의 변화는 Sn과 O에서만 발견되었다. 이것은 Zn와 Mg는 ZnO 및 MgO로만 결합하지만,

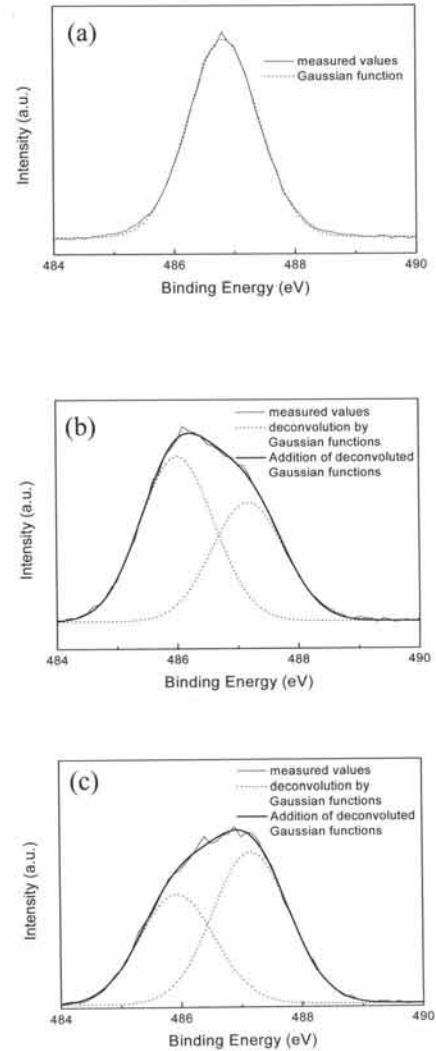


Fig. 7. Sn 3d<sub>5/2</sub> peaks of: (a) ZTO:Mg(0), (b) ZTO:Mg(0.2), and ZTO:Mg(0.4). The peaks were deconvoluted by Gaussian function.

Sn은 SnO 또는 SnO<sub>2</sub>으로 존재할 수 있기 때문일 것이다.

그림 6과 7은 ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)의 O 1s 및 Sn 3d<sub>5/2</sub> 피크를 나타낸 것이다. Gaussian 함수를 사용하여 각 피크를 분해하였다. ZTO:Mg(0)막의 O 1s 피크는 530.6 및 531.7 eV에서 발견되었다. 530.6 eV는 ZnO 및 SnO<sub>2</sub>의 격자에 존재하는 산소에 의한 피크이며 531.7 eV는 산소 빈자리에 의한 것이다. ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)의 경우, 산소 빈자리에

의한 피크가 사라지는 대신 530.6 eV의 피크와 함께 529.5 eV부근에서 새로운 피크가 관측되었다. 529.5 eV에서 새로이 나타나는 피크는 SnO에 의한 것으로 추측하였다. SnO의 존재를 확인하기 위해 Sn 3d<sub>5/2</sub> 피크를 분석하였다. ZTO:Mg(0)막의 Sn 3d<sub>5/2</sub> 피크는 486.8 eV에서만 관측되는데 반해 ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)는 485.9 및 487.1 eV에서 피크가 나타났다. SnO 및 SnO<sub>2</sub>에서 Sn 3d<sub>5/2</sub>와 O 1s 피크의 차이는 약 43.6 eV로 알려져 있다 [10]. ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)에서 Sn과 O의 피크는 43.6 eV (529.5 eV - 485.9 eV) 및 43.5 eV (530.6 eV - 487.1 eV)의 차이를 갖는다. 따라서 ZTO:Mg(0.2)와 ZTO:Mg(0.4)의 Sn 3d<sub>5/2</sub> 및 O 1s 피크는 SnO와 SnO<sub>2</sub>에 의한 피크가 혼합된 상태라고 볼 수 있다. SnO<sub>2</sub>는 SnO에 비해 Sn 3d<sub>5/2</sub> 피크의 값이 큰 것으로 알려져 있다 [10]. 스퍼터링 시 주입된 산소가 ZTO:Mg막에 존재하는 산소 빈자리를 감소시키는 대신 SnO라는 새로운 성분을 생성시킨다는 것을 XPS 결과로부터 알 수 있었다. 산소분압을 높이면 SnO<sub>2</sub>의 피크가 증가하였다.

### 3.2 산소유량에 따른 ZTO:Mg TTFT의 특성

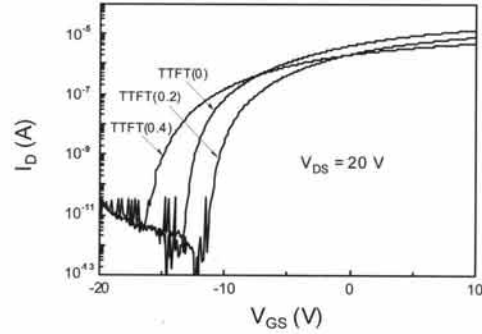
ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)막을 각각 활성층으로 사용하여 TTFT를 제조하고 그 특성을 비교하였다.

본 논문에서는 편의상 ZTO:Mg(0), ZTO:Mg(0.2) 및 ZTO:Mg(0.4)막을 활성층으로 사용하여 제조한 TTFT를 TTFT(0), TTFT(0.2) 및 TTFT(0.4)로 표기하고자 한다. TTFT의 제조에 사용된 ZTO:Mg막의 두께는 약 50 nm였다. 그림 8에 TTFT(0), TTFT(0.2) 및 TTFT(0.4)의 전달 특성을 나타내었다.

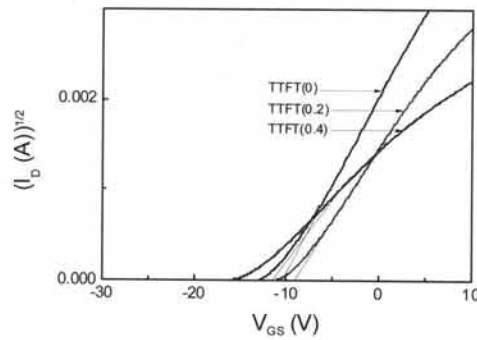
그림 9는 TTFT의 문턱전압을 구하기 위해 그림 8을  $I_{DS}^{1/2}$  vs  $V_{GS}$ 의 그래프로 변형시킨 것이다. 그림 8 및 9를 통하여 구한 TTFT의 이동도( $\mu$ ), 문턱전압( $V_T$ ) 그리고 동작전류 대 차단전류 비( $I_{on}/I_{off}$ )를 표 1에 요약하였다.

**Table 1.** Summary of the mobility ( $\mu$ ), threshold voltage ( $V_T$ ) and  $I_{on}/I_{off}$  of ZTO:Mg TTFTs.

TTFTs	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vsec)	$V_T$ (V)	$\frac{I_{on}}{I_{off}}$
TTFT(0)	3.0	-10	$\sim 10^7$
TTFT(0.2)	2.1	-9	$\sim 10^7$
TTFT(0.4)	0.7	-11	$\sim 4 \times 10^6$



**Fig. 8.** Transfer characteristics ( $I_{DS}$  vs.  $V_{GS}$ ) of ZTO:Mg TTFTs.



**Fig. 9.**  $I_{DS}^{1/2}$  vs.  $V_{GS}$  of ZTO:Mg TTFTs. Threshold voltage was defined as the horizontal intercept of the linear line in graph.

TTFT(0)의  $\mu$ 는 2.5 cm<sup>2</sup>/Vsec였으나 스퍼터링 시 산소의 유량을 늘림에 따라 TTFT(0.2) 및 TTFT(0.4)의  $\mu$ 는 각각 2.1 및 0.7 cm<sup>2</sup>/Vsec로 감소하였다. 이동도  $\mu$ 는 ZTO:Mg막과 게이트절연층의 계면 상태 (interface state)의 영향을 받는데, TTFT의 interface state density는 전달 특성으로부터 간단히 구할 수 있다. TTFT의 최대 계면상태 밀도 (maximum interface state density,  $D_{itmax}$ )는 subthreshold swing(S)과 아래의 관계를 갖는다 [11].

$$D_{max} = \frac{C_{ox}}{q} \left( \frac{qS}{2.3kT} - 1 \right). \quad (3)$$

여기서  $C_{ox}$ 는 게이트의 단위면적당 커패시턴스,  $q$ 는

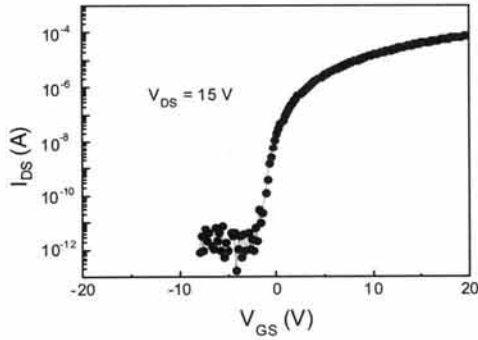


Fig. 10. Transfer characteristics of ZTO TTFT.

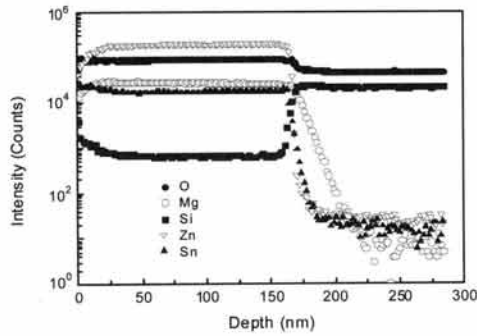


Fig. 11. SIMS results of ZTO:Mg(0) film deposited on a SiO<sub>2</sub> coated Si wafer.

단위 전하량,  $k$ 는 볼츠만 상수 그리고  $T$ 는 절대온도이다. TTFT(0) 및 TTFT(0.2)의  $S$ 는 약 0.5 V/dec로 별 차이가 없었으나, TTFT(0.4)의  $S$ 는 0.7 V/dec로 0.2 V 정도 증가하였다. 식 (3)으로 구한 TTFT(0)의  $D_{i\max}$ 는  $\sim 6.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 였으며, TTFT(0.4)는  $\sim 9.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 였다. 이 결과는 스퍼터링 시 산소의 유량을 늘리면 에너지밴드갭 가장자리의 상태 밀도가 증가한다는 광 특성 측정 결과에 부응한다. 따라서 산소 주입에 따라 게이트절연층과 ZTO:Mg막 사이의 계면상태 밀도가 증가하며 이것이 ZTO:Mg TTFT의 이동도를 감소시키는 것으로 생각된다. ZTO:Mg TTFT의  $V_T$ 는 음의 값을 나타내었으며 산소의 유량에 따른 변화는 확인되지 않았다. 일반적으로 MOSFET의  $V_T$ 는 게이트전극과 활성층의 일함수 차이( $\Phi_{MS}$ ), 계면의 양전하( $Q_i$ ), 디플리션 영역의 양전하( $Q_d$ ), 활성층의 페리미 레벨( $\Phi_F$ )과 아래의 관계를 갖는다 [12].

$$V_T = \Phi_{MS} - \frac{Q_i}{C_{ox}} - \frac{Q_d}{C_{ox}} + 2\Phi_F \quad (4)$$

그림 10은 Mg가 첨가되지 않은 ZTO TTFT의 전달 특성이다. 전달 특성으로부터 구한 ZTO TTFT의  $V_T$ 는  $\sim 3.0$  V였다. 5.0 at%의 Mg를 첨가함에 따라  $V_T$ 가  $-13$  V 감소하였다. 이것은  $Q_i$ ,  $Q_d$ 의 증가 및  $\Phi_F$ 의 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. Mg가 ZnO막의 전자농도를 감소시키는 electron suppressor로 사용되기 때문에  $\Phi_F$ 의 감소는 당연한 것으로 보인다. 그리고 ZTO:Mg에 첨가된 Mg의 양이 5.0 at%인 점을 고려한다면, ZTO TTFT와 ZTO:Mg TTFT 사이에 존재하는  $Q_d$ 의 변화는 무시할 수 있을 만큼 작을 것이다. 결국  $Q_i$ 의 증가, 즉 Mg의 첨가에 따른 ZTO:Mg TTFT 계면의 양전하 밀도 증가가  $V_T$ 이동의 주원인일 것으로 판단된다.  $-13$  V의  $V_T$  감소는  $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 의 양전하( $N_i = \frac{C_{ox} \Delta V_T}{q}$ )가 게이트 절연층의 계면에 형성되었음을 의미한다.

그림 11은 SiO<sub>2</sub>/Si위에 증착한 ZTO:Mg막의 SIMS 결과이다. SIMS 측정의 경우, 각 원소들의 감도 (sensitivity)가 다르기 때문에 측정된 강도차이가 원소 간 농도 차이를 의미하지 않는다. 다만, 강도 비교를 통해 동일한 원소의 깊이에서 다른 원자농도 분포는 확인할 수 있다. Zn, Sn에 비해 Mg가 SiO<sub>2</sub>로 더 깊이 침투한다는 것을 그림 11을 통해 확인할 수 있다. Mg의 원자반경은 0.150 nm로서 Zn(0.135 nm) 및 Sn(0.145 nm)에 비해 커지만 [13], SiO<sub>2</sub>막에서의 확산 계수는 더 높은 것으로 보인다. 게이트유전체로 침투한 Mg가 ZTO:Mg TTFT의 계면에 양전하를 발생시키며 이것이  $V_T$  감소에 영향을 미치는 것으로 사료된다. TTFT(0), TTFT(0.2) 및 TTFT(0.4)의  $I_{on}/I_{off}$ 는 디스플레이의 구동소자로 사용하기에 적합한  $10^6$  이상이었다.

#### 4. 결론

Mg가 5.0 at% 첨가된 ZTO:Mg막을 rf 마그네트론 스퍼터링으로 증착하였다. ZTO:Mg막은 비정질 상태로 증착되었다. 산소를 주입하지 않고 스퍼터링한 ZTO:Mg(0)막의  $E_G$ 는 3.68 eV였다. 5.0 at%의 Mg를 첨가함에 따라 ZTO막의  $E_G$ 가 0.15 eV 증가하였다. O<sub>2</sub>/Ar= 0.2의

산소를 주입하며 스퍼터링한 ZTO:Mg(0.2)막의  $E_G$ 는 3.80 eV로 ZTO:Mg(0)에 비해 0.12 eV 증가하였다. 그러나 산소를  $O_2/Ar=0.4$ 로 증가시킨 ZTO:Mg(0.4)막의 경우에는  $E_G$ 가 3.75 eV로 다시 감소하였다. 과잉산소에 의한 전도대 가장자리의 상태 밀도 증가가  $E_G$  감소의 원인으로 사료된다.

XPS 분석 결과, 스퍼터링 시 산소를 주입하면 ZTO:Mg막의 산소 빈자리가 감소하는 대신 SnO가 새로이 형성됨을 알 수 있었다. ZTO:Mg(0)막을 활성층으로 사용하여 제조한 TTFT의 이동도는  $2.5 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 였으며, 스퍼터링 시 산소를 첨가함에 따라 이동도가 감소하였다. ZTO:Mg TTFT의 이동도 감소는 게이트절연층과 ZTO:Mg막 사이의 계면상태 밀도 증가가 원인인 것으로 보인다. ZTO:Mg TTFT의 문턱전압은 음의 값을 보였으며,  $I_{on}/I_{off}$ 는  $10^6$  이상이었다. 스퍼터링 시 주입되는 산소는 ZTO:Mg막의 에너지밴드갭을 증가시키는 효과가 있으나, TTFT의 특성 개선에는 도움이 되지 않는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2010-0007697).

### REFERENCES

- [1] S. J. Kim, B. Gunduz, D. H. Yoon, H. J. Kim, A. A. Al-Ghamdi, and F. Yakuphanoglu, *Sensor. Actuat. A*, 193, 1 (2013).
- [2] S. M. Jin, N. Cho, E. Yun, H. G. Nam, *Thin Solid Films*, 527, 334 (2013).
- [3] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, 300, 1269 (2003).
- [4] T. Y. Ma, *J. KIEEME*, 25, 304 (2011).
- [5] D. B. Buchholz, D. E. Proffit, M. D. Wisser, T. O. Mason, R. P. H. Chang, *Natural Science: Materials International*, 22, 1 (2012).
- [6] H. Y. Jung, S. Y. Park, J. Kim, H. Yang, R. Choi, D. Kim, J. Bae, W. Shin, and J. K. Jeong, *Thin Solid Films*, 522, 435 (2012).
- [7] H. Chen, J. Ding, W. Guo, F. Shi, and Y. Li, *Appl. Surf. Sci.*, 258, 9913 (2012).
- [8] E. Ziegler, A. Heinrich, H. Oppermann, and G. Stover, *Phys. Status Solidi A*, 66, 635 (1981).
- [9] E. Marquez, J. M. Gonzalez-Leal, R. Jimenez-Garay, S. R. Lukic, and D. M. Petrovic, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 30, 690 (1997).
- [10] J. Szuber, G. Czempik, R. Larciprete, D. Koziej, and B. Adamowicz, *Thin Solid Films*, 391, 198 (2001).
- [11] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization* (A Wiley-Interscience publication, 1990) p. 285.
- [12] B. Streetman, *Solid State Electronic Devices*, (Prentice-Hall, Inc., 1980) p. 309.
- [13] J. C. Slater, *J. of Chemacal Physics*, 41, 3199 (1964).