

## 산화물 반도체 기반의 이종접합 광 검출기

이상은<sup>1,2</sup>, 이경남<sup>1,2</sup>, 예상철<sup>1</sup>, 이성호<sup>1</sup>, 김준동<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup> 인천대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 인천대학교 차세대 에너지 융합연구소 광전에너지소재연구실

### Metal Oxide-Based Heterojunction Broadband Photodetector

Sang-eun Lee<sup>1,2</sup>, Gyeong-Nam Lee<sup>1,2</sup>, Sang-cheol Ye<sup>1</sup>, Sung-ho Lee<sup>1</sup>, and Joondong Kim<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

<sup>2</sup> Photoelectric and Energy Device Application Lab, Multidisciplinary Core Institute for Future Energies, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received November 14, 2017; Revised December 28, 2017; Accepted December 29, 2017)

**Abstract:** In this study, double-layered TCO (transparent conductive oxide) films were produced by depositing two distinct TCO materials: SnO<sub>2</sub> works as an n-type layer and ITO (indium-doped tin oxide) serves as a transparent conductor. Both transparent conductive oxide-films were sequentially deposited by sputtering. The electrical and optical properties of single-layered TCO films (SnO<sub>2</sub>) and double-layered TCO (ITO/SnO<sub>2</sub>) films were investigated. A TCO-embedding photodetector was realized through the formation of an ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al layered structure. The remarkably high rectifying ratio of 400.64 was achieved with the double-layered TCO device, compared to 1.72 with the single-layered TCO device. This result was attributed to the enhanced electrical properties of the double-layered TCO device. With respect to the photoresponses, the photocurrent of the double-layered TCO photodetector was significantly improved: 1,500% of that of the single-layered TCO device. This study suggests that, due to the electrical and optical benefits, double-layered TCO films are effective for enhancing the photoresponses of TCO photodetectors. This provides a useful approach for the design of photoelectric devices, including solar cells and photosensors.

**Keywords:** SnO<sub>2</sub>, Photodetector, Photoresponse, P-Si, ITO

## 1. 서론

TCO (transparent conductive oxide)는 높은 투과율과 전기전도도를 가지는 독특한 물질이다. 가시광선 영역(380~780 nm)에서 투과율이 80%가 넘고 Optical

bandgap은 3.0 eV가 넘으며 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup> Ω의 비저항을 갖는다. TCO의 이러한 특징은 가시광선 영역의 빛을 전기에너지로 바꾸는 데 효과적이다 [1-4]. 특히 높은 투과율의 측면에서 TCO는 박막태양전지에서 투명전기 접점 또는 전극으로 작용하는 다양한 종류의 감광성 전자 장치의 필수 구성 요소이다 [5,6].

TCO 물질 중 하나인 SnO<sub>2</sub>는 n-type 반도체로서 3.6 eV의 넓은 optical band-gap을 가지고 있으며 200°C부터 600°C까지 넓은 온도범위에서 공정이 가능하다. 또한 물리적으로 안정하며 무독성의 성질을 가지고 있고 수급 여건이 좋고 경제적으로도 뛰어나다. 이러한 이점들 때문에 금속산화물들 중에서도 SnO<sub>2</sub>와 관련한 많은 연구

a. Corresponding author; [joonkim@incheon.ac.kr](mailto:joonkim@incheon.ac.kr)

Sang-eun Lee, Gyeong-Nam Lee, Sang-cheol Ye, and Sung-ho Lee equally contributed to this work.

Copyright ©2018 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.

가 이루어지고 있다 [7]. 투과율 측면에서도 가시광선과 근적외선에 대해서 80% 이상의 높은 투과율을 보인다. 그러나 SnO<sub>2</sub> 단일 구조의 경우 비저항이 높아 투명 전도성 전극으로 사용하기 위해서는 다른 물질과의 접합을 통해 전기전도도를 향상시킬 필요가 있다 [8].

한편 SnO<sub>2</sub> 이외에 많이 사용되고 있는 TCO 재료 중 하나는 ITO (indium tin oxide)이다. ITO는 고도로 축퇴된 n-type 반도체이며, 3.5 eV 이상의 optical band gap을 가지고 있다. ITO의 가장 큰 장점은 높은 투과성을 가짐과 동시에 10<sup>-4</sup> cmΩ의 낮은 저항을 가지고 있다는 점이다 [9-11].

본 실험에서는 비저항이 큰 SnO<sub>2</sub>의 단일 구조의 단점을 보완하기 위해 SnO<sub>2</sub>에 ITO를 접합시켜 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al 구조의 광전소자를 제작하였으며, 전류-전압 곡선(dark IV)과 광 응답(photo-response)을 측정하여 ITO를 사용하지 않은 단일 TCO 광전소자(SnO<sub>2</sub>)와 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 p-Si 기판을 이용하여 공정하였고 초음파 클리너로 아세톤, 메탄올, 증류수 순서로 10분간 세정작업을 진행하고 산화 방지를 막기 위해 nitrogen blowing으로 건조작업을 마쳤다.

공정순서는 그림 1에 도식화하였다. SnO<sub>2</sub>는 RF-스퍼터링 기법으로 RF 300 W, Ar (30 sccm) 조건에서 각각 (a) 3분, (b) 6분, (c) 10분간 시간을 달리하여 스퍼터링하였고 100°C에서 열처리를 하였다. 다음으로 ITO를 DC 300 W, Ar (50 sccm), 조건에서 DC-스퍼터링 기법으로 증착하였고 SnO<sub>2</sub>와 마찬가지로 각각 시간을 달리하여 스퍼터링하였다. 스퍼터링을 마친 후 RTP (rapid thermal processing) 공정을 통해 500°C로 급속 열처리를 통하여 ITO의 전도도와 투과도를 높였다. 그리고 기판을 뒤집어 후면 전극인 Al을 상온에서 DC-스퍼터링 기법으로 DC 300 W, Ar (30 sccm) 조건에서 10분간 스퍼터링하였다.

본 실험에서는 이중 TCO층(ITO/SnO<sub>2</sub>)의 전체 두께를 약 120 nm로 하여 ITO/SnO<sub>2</sub> 각 물질의 스퍼터링 시간을 달리하여 두께를 변화시켰다. 전체 두께의 변화가 있을 경우 이중층의 광학적 특성의 변화가 크기 때문에 이를 최대한 배제하고 ITO와 SnO<sub>2</sub>층의 특성을 분석하기 위해 이중층을 120 nm로 유지를 한 상태에서 각 층에 변화를 주었다. Sample 1은 ITO/SnO<sub>2</sub>의 두께를

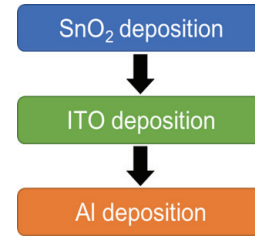


Fig. 1. Fabrication steps of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector.

40 nm/80 nm, sample 2는 80 nm/40 nm, sample 3은 100 nm/20 nm으로 제작하였으며 이를 단일 SnO<sub>2</sub> (120 nm)층을 이용한 reference 소자와 비교 분석하였다.

전계 방출형 주사 현미경(FE-SEM)을 사용하여 소자의 두께와 구조를 관찰하였고, UV-vis spectro photometer (UV-2600)를 사용하여 투과율과 반사율을 측정하고 광 응답 장비(WonA, ZIVE SP1)를 사용하여 광 응답과 임피던스를 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2에는 SnO<sub>2</sub>의 광학적 특성을 나타내었다. 그림 2(a)에서 SnO<sub>2</sub>의 투과율은 400~1,000 nm의 파장에서 증착된 두께 20 nm, 40 nm, 80 nm에 따라 투과율이 각각 90%, 85% 그리고 78%으로 우수한 투과율을 보였다. 그림 2(b)에는 tauc plot을 나타내었으며 photon energy (hv)에 대한 (αhv)<sup>2</sup>의 함수로 나타난다. 여기서 hv와 흡수계수 α는 아래의 식과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (1)$$

$$hv = \frac{1.24}{\lambda} \quad (2)$$

Tauc plot을 통해 SnO<sub>2</sub>의 optical bandgap을 얻을 수 있으며 이번 실험에 사용된 SnO<sub>2</sub> films은 약 3.7~3.9 eV의 optical bandgap을 가지고 있다. SnO<sub>2</sub>의 광학적 특성을 표 1에 나타내었다. SnO<sub>2</sub>의 광학적 특성으로 인해 입사된 빛의 대부분은 SnO<sub>2</sub> films을 투과하여 흡수층으로 사용된 p-Si에 흡수되게 된다. 그 결과 보다 많은 광전자 생성이 가능하게 된다.

그림 3(a)에서 소자 구조의 모식도와 실제 소자 사진을 나타내었다. 그림 3(b)는 전계 방출형 주사 현미

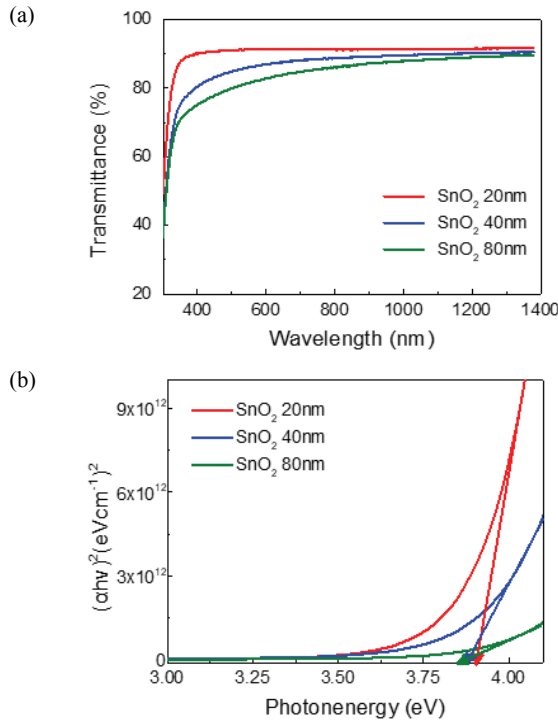


Fig. 2. Optical properties of SnO<sub>2</sub> (a) transmittance and (b) tauc plot.

Table 1. Optical properties of SnO<sub>2</sub>.

Thickness (nm)	Transmittance (%)	Optical bandgap (eV)
20	90	3.81
40	85	3.78
80	78	3.75

경(FM-SEM)을 이용하여 촬영한 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al 소자의 표면과 단면도이다. FE-SEM을 이용하여 p-Si 위에 SnO<sub>2</sub>와 ITO가 증착되었음을 확인하였고 FE-SEM을 이용한 단면도에서 sample 1은 ITO/SnO<sub>2</sub>의 두께가 40 nm/80 nm, sample 2는 80 nm/40 nm, sample 3은 100 nm/20 nm으로 증착된 것을 나타내고 있다.

그림 4에서는 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector의 I-V 특성(a) 그리고 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si의 반사율(b)과 ITO 층만 사용한 경우의 반사율(c)을 나타내었다. P-Si과 SnO<sub>2</sub>의 접합의 quality를 결정하기 위해 rectification ratio(정류비) 수치를 사용하였으며 그 값은 아래 식에서 얻을 수 있다.

$$Rectification\ ratio = \frac{I_{at+0.5V}}{I_{at-0.5V}} \quad (3)$$

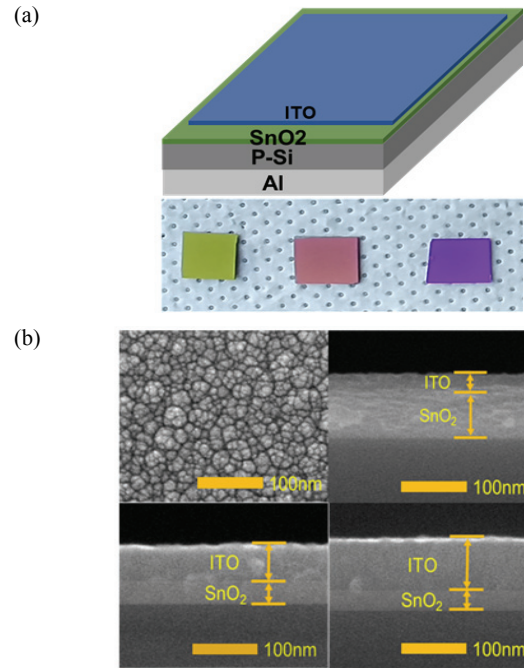
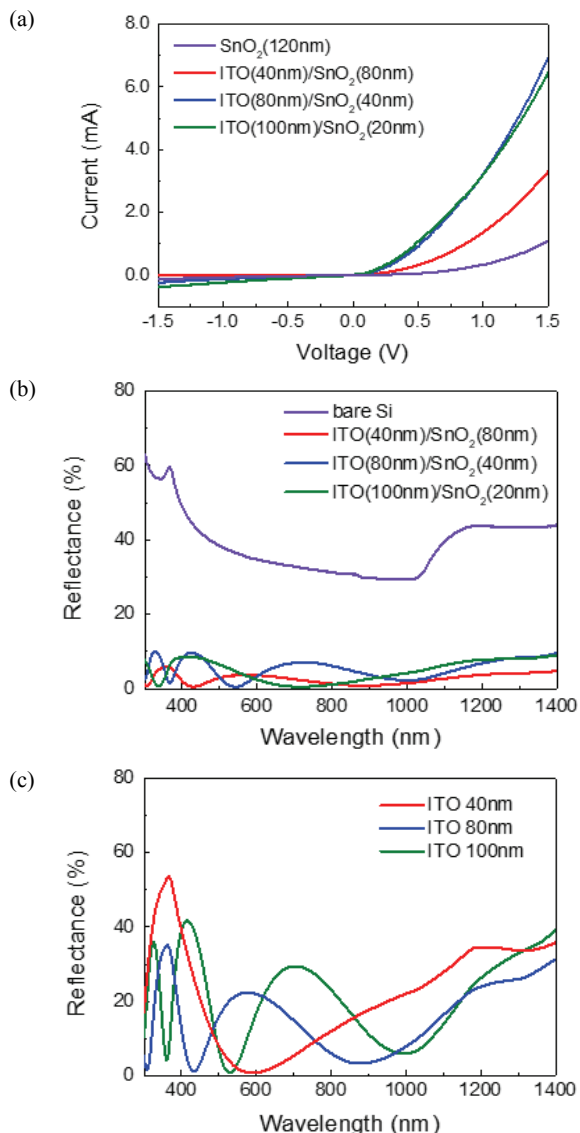


Fig. 3. (a) Schematic and photographic images of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector and (b) SEM images: top-view and cross-section.

정류비는 ITO와 SnO<sub>2</sub>를 각각 40 nm, 80 nm의 두께로 증착한 sample 1에서 400.64, 80 nm, 40 nm로 증착한 sample 2에서 15.36, 100 nm, 20 nm로 증착한 sample 3에서 9.57을 보였으며 SnO<sub>2</sub>만을 120 nm로 증착한 reference에서 1.72가 계산되었다. SnO<sub>2</sub>를 단일 층으로 사용한 소자에 비해 ITO를 이용하였을 때 정류비는 전체적으로 향상된 수치를 보였으며 특히 sample 1에서 크게 향상되었다. 반사율은 sample 1에서 평균 2.77%, sample 2에서 5.55% 그리고 sample 3에서 4.99%를 보였으며 이 값들은 bare Si의 평균적인 반사율인 38.55%과 ITO 단일 층이 Si 위에 증착된 경우와 비교해 크게 저감된 수치이다. 이는 refractive index matching에 의해 큰 반사를 저감을 얻었다고 할 수 있다. 표 2에는 각 소자의 정류비와 반사율을 나타내었다.

빛은 굴절률(refractive index)이 큰 물질을 만나면 투과하지 못하고 반사되게 되는데 이때 큰 굴절률을 가지는 물질과 1의 굴절률을 가지는 공기 사이에 작은 굴절률의 물질을 사용하면 반사율을 줄일 수 있다. 각 층의 굴절률은 아래의 식과 같이 얻을 수 있다.

$$R = \left( \frac{n_s^2 - n_1 n_2}{n_s^2 + n_1 n_2} \right)^2 \quad (4)$$



**Fig. 4.** (a) I-V characteristic of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector, (b) reflectance of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector, and (c) reflectance of ITO/p-Si.

여기서  $R$ 은 반사율,  $n_s$ 는 증착된 물질의 굴절률,  $n_1$ 은 공기의 굴절률( $n_1 = 1$ ),  $n_2$ 는 기판의 굴절률이다. 기판의 굴절률과 공기의 굴절률인 1의 중간 값이 반사율을 최대한 저감시킬 수 있는 이상적인 굴절률이며 이 값은 실리콘 기판의 반사율로부터 계산된 굴절률의 값과 1의 중간 값으로 계산되었다. 식 (4)에 의해 단일 ITO층과 ITO/SnO<sub>2</sub>층의 굴절률을 계산하였으며 이상적인 굴절률과 비교하였다. 굴절률은 455 nm, 560 nm, 740 nm, 980 nm 파장에서 계산되었으며 그 값은 표

**Table 2.** Rectification ratio and reflectance of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector.

	Rectification ratio	Reflectance (%)
Sample 1	400.64	2.77
Sample 2	15.36	5.55
Sample 3	9.57	4.99
Reference	1.72	-
Bare Si	-	38.55

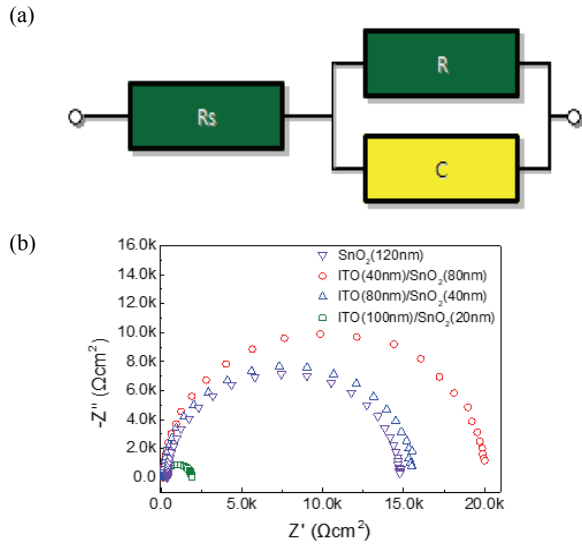
**Table 3.** Refractive index of ITO and ITO/SnO<sub>2</sub> in wavelength of 455 nm, 560 nm, 740 nm, and 980 nm.

	455 nm	560 nm	740 nm	980 nm
ITO (40 nm)	4.41	2.33	2.95	4.01
ITO (80 nm)	3.21	4.46	3.21	2.70
ITO (100 nm)	5.78	2.84	4.93	2.65
Sample 1	2.46	2.63	2.32	2.13
Sample 2	2.92	2.27	2.85	2.33
Sample 3	3.3	2.66	2.1	2.44
Ideal refractive index	2.66	2.39	2.23	2.1

3에 나타내었다. ITO/SnO<sub>2</sub> 이중층은 단일 ITO층과 비교하여 넓은 파장에서 이상적인 굴절률과 가까운 값을 보여주고 있으며 이는 ITO/SnO<sub>2</sub> 이중층이 refractive index matching으로서 더 적합하고 더 낮은 반사율을 보여주는 그림 4(b), (c)의 결과와 일치한다고 할 수 있다.

그림 5(a)는 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector의 임피던스를 보여주고 있으며 임피던스 값은 그림 5(b)의 등가회로를 모델링하여 구하였다. 각 sample의 series 저항  $R_s$ 는 123  $\Omega$  (sample 1), 145  $\Omega$  (sample 2) 그리고 18.62  $\Omega$  (sample 3)이며 389  $\Omega$  (reference)에 비해 크게 줄어들었다. 또한 shunt 저항의 경우 sample 1에서 20.18 k $\Omega$ 으로 14.46 k $\Omega$ 인 reference와 비교하여 증가하였고 sample 2에서는 유사한 값을 보였다. 다만 sample 3에서 1.81 k $\Omega$ 으로 크게 줄어들었는데 이는 얇은 SnO<sub>2</sub>의 두께의 영향이라고 볼 수 있다. 전자의 재결합까지 걸리는 시간 life time ( $\tau$ )은 13.1 ms (sample 1), 10.7 ms (sample 2) 그리고 1.2 ms (sample 3)이고 reference에서 10.3 ms이다.  $\tau$ 는 shunt 저항과 capacitance의 값에서 계산되었으며 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\tau = RC \quad (5)$$



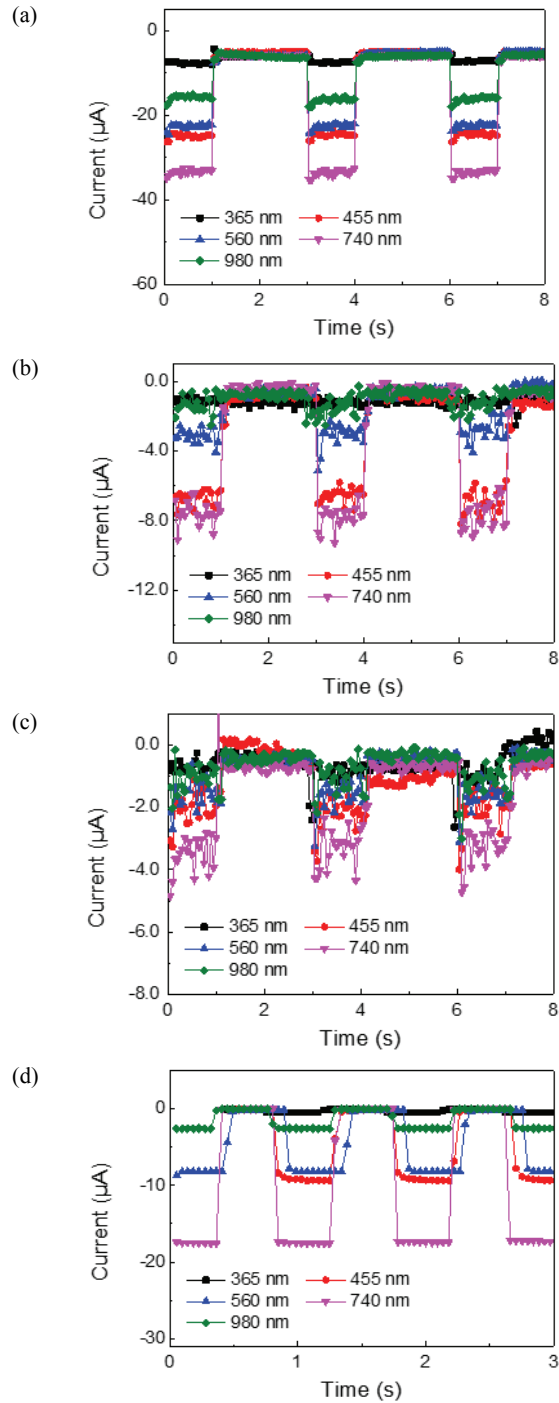
**Fig. 5.** (a) Equivalent circuit showing junction capacitance C, shunt resistance R and series resistance Rs and (b) impedance analysis of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector.

**Table 4.** Impedance and life time of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector.

	Rs (Ω)	R (kΩ)	C (nF)	τ (ms)
Sample 1	123	20.18	648	13.1
Sample 2	145	15.28	701.5	10.7
Sample 3	18.62	1.81	651.8	1.2
Reference	389	14.46	714.2	10.3

표 4에는 각 소자들의 임피던스와 τ를 나타내었다.

그림 6(a)~(d)는 빛이 조사되었을 때와 그렇지 않을 때의 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al 광 검출기의 광 응답을 보여 주고 있다. 응답파장은 자외선(365 nm), 가시광선 영역 (Blue: 455 nm, Green: 560 nm, Red: 740 nm), 적외선(980 nm)이다. 표 5에는 각 소자의 파장별 광전류 수치를 나타내었다. Sample 1의 경우 365~980 nm의 전 파장에서 reference sample과 비교하여 평균 200%의 큰 상승을 보였고 단파장에서는 약 1,500%의 증가를 보였다. 이는 ITO에 의해 소자의 series 저항이 크게 감소하였고 sample 1의 경우 τ의 수치가 13.1 ms로 단일 SnO<sub>2</sub> 소자의 10.3 ms와 비교하여 향상되었기 때문이라고 할 수 있다. 하지만 sample 2와 sample 3의 경우 오히려 광전류의 수치가 감소하였다. ITO에 의해 저항이 줄어들었지만 SnO<sub>2</sub>의 두께 감소로 인해 접합의 quality가 낮아졌기 때문이라고 볼 수 있다. 즉 접



**Fig. 6.** Photo-response of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector (a) ITO (40 nm)/SnO<sub>2</sub> (80 nm), (b) ITO (80 nm)/SnO<sub>2</sub> (40 nm), (c) ITO (100 nm)/SnO<sub>2</sub> (20 nm), and (d) SnO<sub>2</sub> (120 nm).

합의 quality 저하를 피하기 위해 최소 약 80 nm의 두께가 필요하다.

**Table 5.** Photocurrent of ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al photodetector.

	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )				
	365 nm	455 nm	560 nm	740 nm	980 nm
S.1	7.45	24.8	22.6	33.5	16.0
S.2	1.16	6.75	2.95	7.56	1.34
S.3	0.81	2.13	1.46	3.74	1.08
Ref	0.49	9.00	7.44	16.9	2.43

#### 4. 결론

본 연구에서는 스퍼터링 공정을 이용하여 SnO<sub>2</sub>의 광학적 특성을 분석하고 p-Si 기판에 SnO<sub>2</sub>와 ITO를 이용한 이중층 TCO를 제작하여 ITO를 적용하지 않은 단일 SnO<sub>2</sub> 소자와 성능을 비교, 분석하였다.

I-V 특성 그래프에서 단일 TCO층(SnO<sub>2</sub>)보다 이중층 TCO인 ITO/SnO<sub>2</sub>를 이용한 소자에서 정류비가 크게 향상되었다. 또한 ITO/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al 구조에서 확산 광전류의 증가를 보였으며, 실제적인 광전소자의 성능이 향상되었음을 알 수 있다. Sample 1에서 광전류 수치는 각 파장에 대해 전체적으로 향상되었으며 특히 자외선(365 nm), 적외선(980 nm) 영역에서의 이득이 매우 두드러졌다. 이는 ITO에 의한 series 저항의 감소와 life time의 증가 그리고 ITO/SnO<sub>2</sub>층의 낮은 반사율에 의한 결과로 분석된다. 결과적으로 ITO/SnO<sub>2</sub> 이중 TCO층은 단일 SnO<sub>2</sub>와 비교하여 광 검출기의 성능을 증가시켰다.

이번 연구는 SnO<sub>2</sub>와 p-Si의 single junction을 이용한 광전소자의 제작과 ITO층을 이용한 성능 향상에 그 목적이 있다. 이는 향후 Si 기반의 광전소자 개발에 있어 보다 다양한 방식을 제시할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

The authors acknowledge the financial support of Basic Science Research Program through the National

Research Foundation (NRF) of Korea by the Ministry of Education (NRF-2015R1D1A1A01059165) and Incheon National University.

#### REFERENCES

- [1] J. George, R. Haley, B. Pate, S. Rozeveld, M. Krafft, M. T. Bernius, and S. Yeung, *Proc. 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Philadelphia, USA, 2009), p. 000440.
- [2] D. W. Kang, S. H. Kuk, K. S. Ji, H. M. Lee, and M. K. Han, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 138 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.068>]
- [3] D. J. Lee, J. Kim, G. E. Fernandes, J. H. Kim, C. M. Bledt, K. B. Kim, and J. Xu, *Proc. 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* (IEEE, San Jose, USA, 2015) p. 1.
- [4] R.E.I. Schropp, J. K. Rath, and L. T. Yan, *Proc. 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (IEEE, Seattle, USA, 2011) p. 000274.
- [5] C. Guillén and J. Herrero, *Thin Solid Films*, **520**, 1 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.06.091>]
- [6] J. H. Yun and J. Kim, *Mater. Lett.*, **70**, 4 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.11.053>]
- [7] P. S. Kolhe, P. M. Koinkar, N. Maiti, and K. M. Sonawane, *Phys. B*, **524**, 90 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.07.056>]
- [8] M. Batzill and U. Diebold, *Prog. Surf. Sci.*, **79**, 47 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2005.09.002>]
- [9] M.F.B.M. Nasir and M. H. Mamat, *Proc. 2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)* (IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016) p. 1.
- [10] B. He, Z. Q. Ma, J. Xu, L. Zhao, N. S. Zhang, F. Li, C. Shen, L. Shen, X. J. Meng, C. Y. Zhou, Z. S. Yu, and Y. T. Yin, *Superlattices Microstruct.*, **46**, 664 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2009.04.013>]
- [11] S. S. Shinde and K. Y. Rajpure, *Mater. Res. Bull.*, **46**, 1734 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.05.032>]