

각 층에 따른 염료감응형 태양전지의 특성 개선 - I (- 상부전극을 중심으로)

마재평[†] · 박치선^{*}

[†]호남대학교 전자·광공학과, ^{*}한서대학교 전자공학과

An Improvement of the Characteristics of DSSC by Each Layers - I (- Upper Electrode)

Jae Pyung Mah[†] and Chi Sun Park^{*}

[†]Department of Electronic and Photonic Engineering, Honam University, Gwangju 506-090, Korea

^{*}Department of Electronic Engineering, Hanseo University, Choongnam 356-706, Korea

ABSTRACT

Photovoltaic effect is confirmed in DSSC fabricated under the common conditions. In upper electrodes, validity of ZnO as new TCO material was investigated and an improvement of characteristics in DSSC was tried by control of process conditions at semiconductive powder layer. ZnO thin film showed very high resistivity, therefore efficiency of solar cell was lower than that of conventional ITO-related material. DSSC characteristics was able to improve by thin blocking layer deposited between the TCO and semiconductor layer.

Key Words : DSSC, photovoltaic effect, upper electrode, ZnO, TCO, solar cell, ITO, blocking layer

1. 서 론

인류가 Homo erectus 시절 불을 발견한 이래 100만년이 흘렀다[1]. 근자에는 석탄에 이어 원유를 주로 사용하는 화력발전으로 생산하는 전기가 주 에너지원이다.

그런데 후발 거대개도국들의 공업화 및 삶의 질 향상은 가뜰이나 한정적 매장량을 갖는 원유 수요를 폭발시키며 고가화시키고 있고 소진 시기를 앞당기는 중이다. 게다가 화력은 근본적으로 연소 반응이므로 CO₂를 꾸준히 방출하여 지구온난화의 주 요인이 되고 있다. 그에 대한 대안인 원자력은 가끔 거대한 위험과 오염을 유발하므로 꺼리는 분위기가 상존한다.

최근에는 대체에너지의 하나로 태양전지가 국내외적으로 관심을 끌고 있다. 태양전지는 작동의 근원인 태양빛이 무료라는 점 및 환경오염에서 자유롭다는 장점

이 있는 반면 대부분 반도체 기반이어서 재료 및 공정이 초고가라는 약점도 있다. 염료감응형 태양전지(DSSC, Dye-Sensitized Solar Cell)는 저가형 태양전지의 대표격이어서 관심이 많다.

염료감응형 태양전지는 1991년에 O'Regan과 Grtzel 등이 값싼 TiO₂ 반도체와 Ru 계열의 염료를 이용해서 상당한 효율로 태양빛을 전기에너지로 바꿀 수 있는 연구결과를 발표하여 광전기 화학 분야에 종사하는 연구자들의 많은 관심을 불러 일으킨 바 있다[2].

반도체 공정을 거의 사용하지 않고도 저가로 제조할 수 있고 형태와 크기에 있어서도 매우 자유로운 장점이 있는 염료감응형 태양전지는 여러 층으로 이루어진다. 상부전극쪽부터 보면 대체로 TCO(투명 전도성 산화물, transparent conductive oxide) glass를 기판으로 하고, 반도체 분말층, 염료(dye), 전해질 물질, 상대 전극(counter electrode)의 구조를 갖고 있다.

여기서 상부전극은 TCO 및 반도체 층을 이르는데 TCO 물질로는 대부분의 광소자가 그러하듯 ITO(Indium Tin Oxide) 계열이 사용된다. 그런데 ITO 계열

[†]E-mail : jpmah@honam.ac.kr

은 고가여서 보다 저가이고 광투과율(transmittance) 및 비저항(resistivity)에서는 손색이 없는 물질을 찾아 박막으로 형성시켜 기존 TCO 물질의 대체 가능성을 탐색해볼 필요가 있다.

ZnO는 II-VI족 화합물 반도체로서 넓은 에너지 밴드갭(3.2 eV)을 가지고 있으며 그 결정 구조는 wurtzite crystal structure이다. Oxide 계열이면서도 좋은 전기전도도를 갖고 있으며 뛰어난 광학적 특성과 SnO₂ 계열에 비해 낮은 단가로, ZnO는 그 실용적 응용을 위해 현재 널리 연구되고 있다[3,4]. ZnO는 최근 LCD, PDP 등 평판 디스플레이(Flat panel display) 산업의 비약적 발전에 따른 평판 디스플레이의 투명전도성 전극으로 관심을 끌고 있을 뿐만 아니라, 넓은 에너지 밴드갭에 따른 단파장 LED(Light emitting diode)[5] 차세대 에너지원으로 그 기대가 큰 유무기 태양전지의 window material 등 그 응용 분야가 넓다.

한편 염료를 흡착할 수 있는 전극 소재는 에너지 밴드갭이 큰 반도체 나노결정(직경 15~20 nm) 산화물을 사용한다. 나노 크기의 물질을 사용하는 이유는 입자 크기 감소에 의한 비표면적 증가로 보다 많은 양의 광감염료분자를 흡착시킬 수 있고 이는 접합(junction)의 양 증가와 직결되며 결과적으로 보다 큰 전력을 만들 수 있기 때문이다. 지금까지 연구되어온 산화물은 주로 TiO₂[5], SnO₂[6], ZnO[7], Nb₂O₅[8] 등이다. 이들 물질 가운데 지금까지 가장 좋은 효율을 보이는 물질은 TiO₂로 알려져 있다. TiO₂는 세 가지 상(phase)이 알려져 있는데, 저온에서 안정한 아나타제(anatase)상과 고온에서 안정한 루타일(rutile)상 및 브루카이트(brookite)상이 존재한다. 이중 광전류-전압 특성이 가장 좋은 아나타제가 염료 감응형 태양전지의 나노 결정 소재로 가장 많이 쓰인다[9].

염료감응형 태양전지의 상부쪽을 구성하는 층은 TCO와 반도체 분말층이다. 염료에서 전자는 태양빛을 흡수하여 jump한 후 반도체 층으로 이끌리고 TCO 층을 거쳐 바깥 회로로 나가므로 상부의 두 층은 태양전지 특성에 미치는 영향이 크다.

본 연구에서는 저가형 TCO를 지향하기 위해 ZnO로의 대체 가능성을 실험으로 알아보고자 하였다.

ZnO는 내부 결함의 유동성은 있지만[12] 기존의 ITO 계열의 TCO 물질에 비해 가격이 훨씬 저가여서 염료감응형 태양전지의 지향점에 부응할 수 있고, bulk 상태에서의 비저항 및 광투과율에서는 부족함이 없고 박막에서의 큰 비저항은 Tin oxide 계열의 진보처럼 doping에 의해 극복할 수 있다고 보아 TCO로 채택하였다.

한편, 염료감응형 태양전지가 성능을 제대로 내기 위해서는 염료에서 여기된 전자가 TiO₂ 계면을 따라 TCO 층으로 이동하기 전에 산화된 염료나 전해질과 재결합(recombine)하는 것을 차단하는 것, 그리고 염료와 TCO의 직접적 접촉을 차단하는 것 등이 필요하다. 본 연구에서는 계면에 차단층(blocking layer)을 형성함으로써 이를 극복하여 궁극적으로 염료감응형 태양전지의 특성 증진에 일조해보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 보편적 조건 하에서의 염료감응형 태양전지의 제조 및 특성 측정

염료감응형 태양전지의 반도체 산화물로 쓰이는 나노 입자 TiO₂는 Degussa의 P25를 사용하였고, 용매로 적당량의 Ethylene Glycol, Acetic acid, Triton X-100 등을 사용, 혼합하여 각각을 paste로 만들었다[10,11]. 이 TiO₂ paste를 투명전도성 유리 기판상에 도포 후, furnace에 넣어 450°C에서 30분간 소결하였다. 투명전도성 유리 위에 소결된 TiO₂ film은 SEM(scanning electron microscope)으로 관찰하였다.

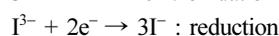
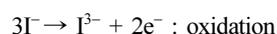
TCO 물질로는 ZnO를 사용하였고 비교를 위해 FTO(Fluorine-doped Tin Oxide)도 사용하여 보편적인 염료감응형 태양전지를 우선 제조, 특성을 측정하였다.

TCO층으로 채택한 ZnO는 rf magnetron 스퍼터링기(sputtering system)를 사용하여 증착하였다. Ar gas는 50 sccm 주었고 MFC(mass flow controller)로서 유입량을 조절하였다. Base pressure는 10⁻⁶ torr order까지 뽑아주었고, working pressure를 5.0 × 10⁻² torr로 하여 2시간 30분간 deposit 하였다.

빨간색 염료 중 저가형인 Eosin-Y[13,14]를 채택하여 ethanol을 용매로 1:3으로 섞은 용액으로 만든 후 sample 위에 약간씩 떨어뜨려 소결한 TiO₂ 층을 완전히 덮게한 후 건조를 반복해주었다. 아울러 sample을 염료 용액에 담그는 방법도 시행하여 특성을 비교해 보았다.

하부 전극으로는 반사도가 좋은 Pt 및 비교적 저가인 Ag 등을 채택하여 열증착기로 증착해 주었다.

전해질은 I⁻/I³⁻와 같은 산화/환원 종을 채택하여 사용하였다. I⁻ ion의 source로는 LiI(6.7 mg), 그리고 I³⁻ ion의 source로는 acetonitrile(5 mL)을 용매로 I₂(1.3 mL)를 녹여서 사용하였다. 이 전해질 물질과 관련된 산화, 환원 반응식은 각각 다음과 같다.



제조한 DSSC samples의 전기적 특성의 측정에는 Agilent 34401A multimeter를 사용하였다.

2.2. TCO 층

본 연구에서는 염료감응형 태양전지의 TCO로서 ZnO의 적용 가능성을 탐색하기 위해, ZnO 박막의 전기적광학적 특성부터 조사해 보았다. 기본적인 접근의 일환으로, process gas로 Ar gas 만을 주로 사용하였고 상온에서 rf-magnetron sputtering을 이용해 ZnO 박막을 증착했다. 공정 조건으로 forward bias power에 따른 증착 속도와 증착 속도를 제어함에 따른 각 ZnO 박막 두께의 비저항(resistivity) 및 광투과율 등을 조사했다. 그리고 염료감응형 태양전지의 window layer로 흔히 사용되는 FTO와 직접 형성시킨 ZnO 박막을 이용한 염료감응형 태양전지를 제조했다. 이와같이 제조한 염료감응형 태양전지의 V_{OC} , I_{SC} 및 그 에너지 변환 효율을 비교, 고찰해 보았다.

ZnO 박막은 rf-magnetron 스퍼터링기를 이용해 증착했다. 우선 불순물을 dope하지 않은 ZnO target을 사용하였고, 40~120 Watt의 forward bias power를 인가해 Si wafer 및 glass 상에 상온에서 증착했다.

Si wafer 위에 증착된 ZnO 박막을 Hitachi사(S-4700)의 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용해 박막 두께를 측정하고 증착한 시간으로 나뉘어서 증착 속도를 구했고 Accent Optical Technologies사(HL5500PC)의 Hall effect 측정기로 비저항을 조사했다. 또 glass 위에 증착한 ZnO 박막의 광투과율은 Varian사의 spectrophotometer(Cary500Scan)로 측정했다. 실험의 기본적인 조건은 다음의 Table 1과 같다.

TiO₂ 나노 입자 paste를 FTO 또는 ZnO 위에 도포 후, hot plate에서 500°C에서 30분간 소결했다. 이어 SEM으로 TiO₂ 박막의 미세구조를 관찰하고 두께를 확인했다.

Table 1. Formation conditions of ZnO thin film.

target	Bulk-ZnO target
substrate	Si wafer, glass
target-substrate distance	50(mm)
base pressure	6.0×10^{-6} torr.
working pressure	5.0×10^{-2} torr.
process gas	Ar only
temperature	room temp.
rf power	40~120 watt
film thickness	160~1900 nm

TiO₂ 나노 입자가 소결된 투명 전도성 전극을 Eosin-Y가 녹아있는 용액에 24시간동안 담가 염료를 TiO₂ 나노 입자에 흡착시켰다. 상대 전극으로 쓰일 Pt를 증착한 후 투명 전도성 전극을 염료가 흡착된 TiO₂ 나노 입자 전극에 덧대고 hot melt sealing material을 이용, hot plate상에서 두 투명 전도성 전극을 접착시켰다. 그 후 미리 뚫어놓은 구멍을 통해 전해질 용액을 주입하고 sealing하여 염료감응형 태양전지 sample을 제작하였다.

마지막으로 AM1.5 조건에서 Xenon lamp를 이용해 염료감응형 태양전지에 2.13 W/cm²의 광 에너지를 조사해, 이때 생성되는 V_{OC} , I_{SC} 그리고 에너지 변환 효율을 측정했다.

2.3. 반도체 층

염료감응형 태양전지의 특성을 증진시키기 위해 TiO₂ 차단층을 rf-magnetron 스퍼터링 방법으로 TCO층인 FTO(F-doped SnO₂) 위에, 즉 TCO층과 반도체 층 사이에, 170 nm 두께로 얇게 삽입하는 모양으로 형성시키고, TiO₂ 박막의 상 형성 온도에 따른 염료감응형 태양전지의 특성을 조사해보았다. 스퍼터링에는 Bulk-TiO₂ target을 사용하였다.

온도에 따른 TiO₂ 박막의 상 변화를 확인하기 위한 post-annealing은 furnace를 이용해 300°C, 600°C에서 진행했다. 열처리된 TiO₂ 박막이 증착된 FTO glass 위에 Solaronix사의 Tatania paste를 이용하여 Dr. Blade 방법으로[15,16] TiO₂ 층을 형성하고, 500°C에서 1시간 동안 소결시켰다. Ethanol에 희석한 Eosin-Y 염료를 TiO₂ 나노 입자 층 위에 24시간 동안 흡착시켰다. 그 후, 상대 전극으로 쓰일 Pt에 염료가 흡착된 TiO₂ 나노 입자 부분을 덧대고 두 FTO glass를 접착시켰다. 그 후 전해질(Iodide based Iodolyte AN-50)을 주입하고 구멍을 메움으로써 염료감응형 태양전지를 완성한 후 광-전기적 특성을 측정했다.

열처리에 따른 TiO₂ 박막의 상(phase) 변화를 확인하기 위해 PANalitical사(Xpert PRO)의 XRD(X-ray diffractometer)를 이용했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 보편적 조건으로 제조한 염료감응형 태양전지

제조한 DSSC 셀에 빛을 비취본 결과 open-circuit voltage(V_{OC})가 나타났다. 일반적 실험실 조건하에서 고도의 제조 공정을 사용하지 않고 비교적 저가의 재료들을 사용하여 성능이 나오는 태양전지의 제조가 가능함을 알 수 있었다. 위와같이 보편적 조건 하에서 제조해

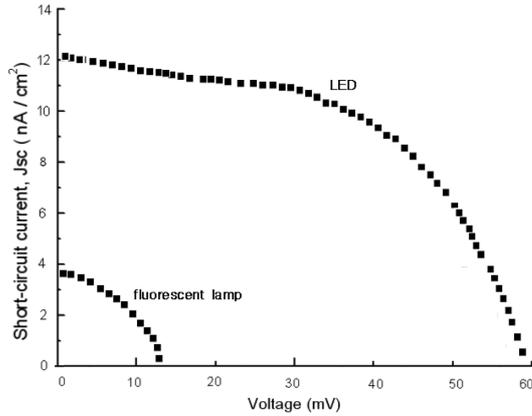


Fig. 1. Photovoltaic properties of the sample under simple condition.

본 염료감응형 태양전지를 실내에서 주변의 간단한 빛을 light source로 하여 특성을 측정해본 결과 Fig. 1과 같았다.

한편 Fig. 1에서 open-circuit voltage 값이 비교적 작게 나타났는데, 이는 우선 약한 광원을 사용하였고, TCO층을 고체bulk가 아닌 박막층으로 형성시켰기 때문이라고 생각되었다. 게다가 위와같은 기본적인 조건으로 채택한 저가의 ZnO는 비화학양론적인 화합물(nonstoichiometric compound)을 형성하는 경향이 강하여[12] 박막으로 증착할 경우 물성의 유동 범위가 매우 커지기 때문으로 생각할 수 있었다.

한편, 염료층 형성시 용액에 담그는 방법도 시도해보았는데, 그렇게 제작한 sample은 측정값의 유동성이 컸지만 최대 95 mV까지의 open-circuit voltage를 나타내서, 염료감응형 태양전지는 제조 공정에 따라 커다란 가능성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

3.2. TCO 층

우선 rf power에 따른 ZnO 박막의 증착속도는 forward bias power를 각각 40, 80, 120 watt로 주어 ZnO를 증착한 후 SEM으로 profile을 관찰하였다. Fig. 2는 forward bias power가 120 W일 때, ZnO 박막을 Si wafer 상에 증착시킨 sample의 SEM profile이다.

각 sputtering power 하에서 시간에 따른 증착 두께로부터 증착 속도(dosition rate)를 환산할 수 있었는데 그 결과는 Fig. 3과 같았다.

Fig. 3에서, forward bias power가 증가함에 따라 증착속도는 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

각 forward bias power에 따른 증착속도를 얻은 다음, 동일한 두께(230 nm)에서 증착속도를 달리하여 비저항

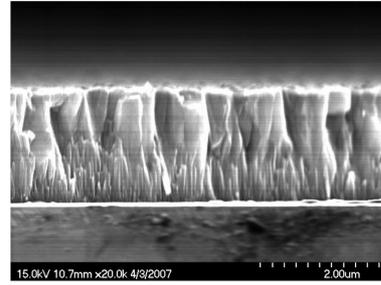


Fig. 2. Cross-sectional SEM micrograph of ZnO thin film formed at 120W-forward bias power.

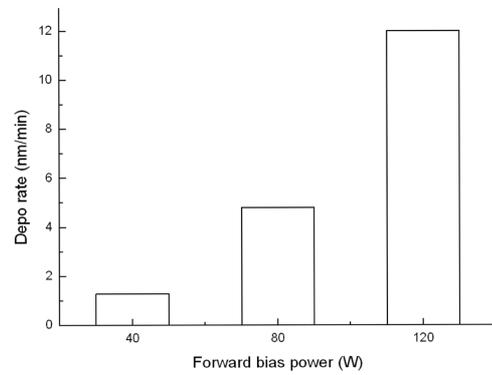


Fig. 3. Depo. rate of ZnO thin film by the forward bias powers.

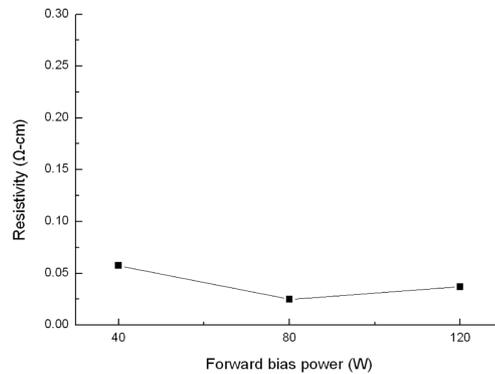


Fig. 4. Resistivity of ZnO thin films as a function of forward bias power.

을 조사해 본 결과 Fig. 4와 같았다. 본 연구 조건에서 형성시킨 ZnO 박막의 비저항은 대체로 증착속도에 관계없이 10^{-2} Ω-cm order를 나타냄을 볼 수 있다.

조건을 바꿔서, 동일한 증착속도 하에서 박막두께에 따른 비저항을 조사해본 결과 Fig. 5와 같았는데, 동일 증착속도 하에서 ZnO 박막 두께에 큰 영향 없이 각 조

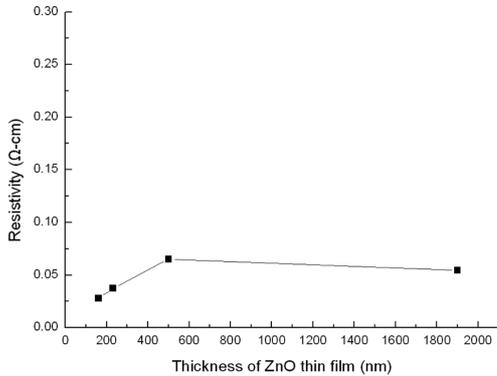


Fig. 5. Resistivity of ZnO thin films as a function of film thickness.

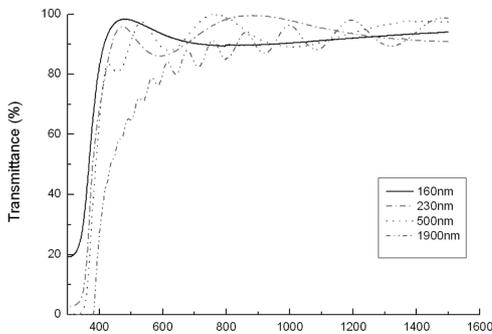


Fig. 6. Transmittance of ZnO thin films with film thickness.

건의 비저항이 $10^{-2} \Omega\text{-cm}$ 정도를 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

ZnO 박막의 두께에 따른 광학적 특성을 조사하기 위해 forward bias power가 120 watt인 조건에서 증착 시간을 변수로 하여 160, 230, 500, 1900 nm 두께의 ZnO 박막을 제조하여 광투과율을 spectrophotometer를 이용해 측정된 결과 Fig. 6과 같이 나타났다. 여기서 ZnO 박막의 두께가 160, 230, 500, 1900 nm일 때 광투과율은 각각 87.8, 87.3, 86.4 78.9%로 박막 두께가 증가함에 따라서 광투과율이 약간씩 낮아짐을 확인하였다.

이상으로부터 염료감응형 태양전지의 TCO로 사용할 ZnO 박막의 형성 조건을, 전기전도도와 광투과율이 모두 우수한 120 watt의 forward bias power 하에서 박막 두께를 230 nm 증착한 경우를 결정하여 실험을 진행했다.

염료감응형 태양전지에 사용할 ZnO 박막과 시제품인 FTO glass의 비저항과 광투과율을 측정된 결과 Table 2와 같았다.

Table 2. Resistivity and transmittance of ZnO & FTO thin films.

	ZnO	FTO
resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	2.27×10^{-2}	5.96×10^{-4}
sheet resistance (Ω/sq)	1424	12.68
transmittance (%)	87	86

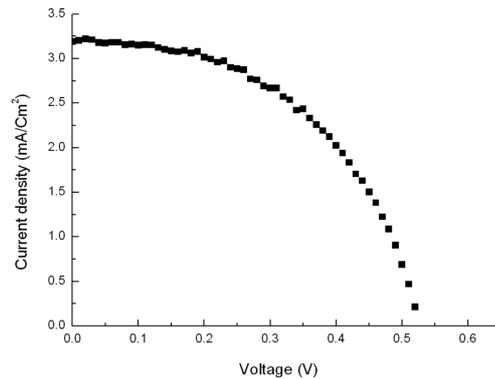


Fig. 7. Current density-voltage characteristics for FTO/Pt-based dye-sensitized solar cell.

ZnO 박막의 비저항은 FTO glass보다 10^2 order 정도 큰 것으로 나타났다. 전기전도 성향이 이렇게 큰 차이가 나는 만큼, 염료감응형 태양전지의 투명 전도성 전극으로 ZnO 박막을 사용하면 일단은 FTO에 비해 그 효율이 낮게 나오리라 예측된다. 광투과율은 두 TCO 물질 모두에서 85% 이상으로 양호한 값을 보였다.

Fig. 7은 FTO를 TCO로 하고 하부전극으로 Pt을 사용한 경우의 전류밀도-전압 특성이다.

일반적 보고에 비해 전류밀도가 상당히 작게 나오는데, 이는 TCO 위에 TiO_2 나노 입자가 고온의 소결과정에서 일부 입자의 응집에 따른 입도의 불균일성 때문에 전류밀도가 낮아진 것으로 생각된다.

3.3. 반도체 층

차단층인 TiO_2 박막의 어닐링 온도에 따른 상 형성을 XRD로 분석한 결과 전의 보고와 같이[17] 600°C 에서 rutile 상의 peak 값이, 300°C 에서 anatase 상의 peak 값이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

각 annealing 온도에서 차단층으로 TiO_2 박막을 형성 시켜준 염료감응형 태양전지와 차단층을 형성하지 않은 경우, 염료감응형 태양전지를 제작하여 Xenon lamp를 태양광원으로 사용하여 측정된 결과 V_{oc} 와 J_{sc} 는 각각 Fig. 8, 9와 같았다.

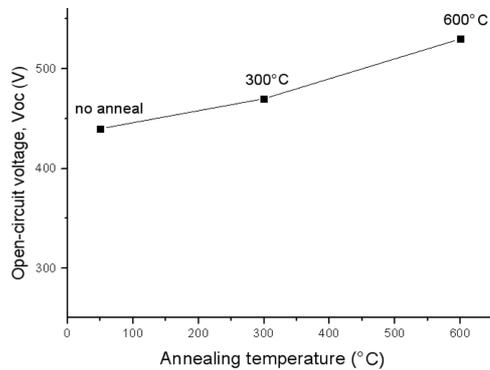


Fig. 8. Open-circuit voltage with annealing temperature.

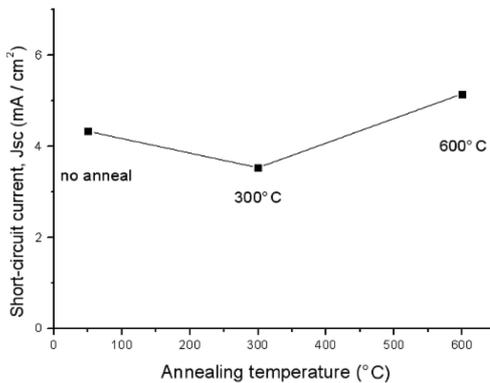


Fig. 9. Short-circuit current with annealing temperature.

600°C에서 어닐링한 샘플이 V_{OC} , J_{SC} 가 모두 월등히 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 600°C에서 어닐링한 TiO_2 박막의 상이 rutile 이기 때문인 것으로 판단된다. 한편 기존의 보고[18]와는 달리 차단층으로 증착한 TiO_2 를 300°C에서 어닐링 한 경우 J_{SC} 가 감소하였는데, 이는 차단층이 저항층으로 작용한[19] 결과인 것으로 생각할 수 있었다.

4. 결 론

염료감응형 태양전지의 상부전극을 이루는 TCO 및 반도체성 TiO_2 층에 대한 연구에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

ZnO 박막을 TCO로, Eosin-y를 염료로 하여 직접 제조한 염료감응형 태양전지에서 open-circuit voltage가 생성되고 빛의 세기가 강해질수록 전압이 커짐을 확인하였다. 반도체 TiO_2 층에 대해서는 특성 향상을 위해 차단층을 채택하여 TiO_2 박막을 스퍼터링 방법으로 증착시킨 후 어닐링한 결과 600°C의 경우가 가장 좋은

태양전지 특성을 나타냈다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00345).

참고문헌

1. R. Leakey, 황현숙 역, 인류의 기원, p.19 and p.117, 1995.
2. B. O'Regan and M. Grätzel, "A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films", *Nature*, 353, pp. 737-740 (1991).
3. K. A. Abdullin, A. B. Aimagambetov, N. B. Beisenkhanov, A. T. Issova, B. N. Mukashev and S. Zh. Tokmoldin, "Electrical and optical properties of zinc oxide thin films grown by reactive magnetron sputtering method", *Materials Science and Engineering B*, 109, pp. 241-244, 2004.
4. S. Kishimoto, T. Yamamoto, Y. Nakagawa, K. Ikeda, H. Makino and T. Yamada, "Dependence of electrical and structural properties on film thickness of undoped ZnO thin films prepared by plasma-assisted electron beam deposition", *Superlattices and Microstructures*, 39, pp. 306-313, 2006.
5. Z. Z. Zhang, Z. P. Wei, Y. M. Lu, D. Z. Shen, B. Yao, B. H. Li, D. X. Zhao, J. Y. Zhang, X. W. Fan and Z. K. Tang, "p-Type ZnO on sapphire by using O_2 - N_2 co-activating and fabrication of ZnO LED", *Journal of Crystal Growth*, 301-302, pp. 362-365, 2007.
6. S. Ferrere, A. Zaban and B. A. Gregg, "Dye Sensitization of Nanocrystalline Tin Oxide by Perylene Derivatives", *J. Phys. Chem., B*, 101, 4490, 1997.
7. T. Oekermann, T. Yoshida, H. Tada and H. Minoura, "Color-sensitive photoconductivity of nanostructured ZnO dye hybrid films prepared by one-step electrodeposition", *Thin Solid Films*, 511-512, pp. 354-357, 2006.
8. F. Lenzenmann, J. Krueger, S. Burnside, K. Brooks, M. Grätzel, D. Gal, S. Rühle, and D. Cahen, "Surface photovoltage Spectroscopy of Dye-Sensitized Solar Cell with TiO_2 , Nb_2O_5 , and $SrTiO_3$ Nanocrystalline Photodes: Indication for Electron Injection from Higher Excited Dye states", *J. Phys. Chem., B*, 105, 8989, 2000.
9. S. K. Deb, "Dye-sensitized TiO_2 thin-film solar cell research at the National Renewable Energy Laboratory (NREL)", *Solar Energy Materials & Solar cells*,

- 88, pp. 1-10, 2005.
10. S. Yanagida, "Recent research progress of dye-sensitized solar cells in Japan", *C. R. Chimie*, 9, pp. 597-604, 2006.
 11. S. J. Lee and C. H. Lee, "Fabrication of nano-sized TiO₂ powder via an ethylene glycol entrapment route", *Materials Letters*, 56, pp. 705-708, 2002.
 12. S. O. Kasap, *Electronic Materials and Devices (3rd)*, McGraw-Hill, pp. 75-76, 2005.
 13. S. K. Deb, "Dye-sensitized TiO₂ thin-film solar cell research at the National Renewable Energy Laboratory (NREL)", *Solar Energy Materials & Solar cells*, 88, pp. 1-10, 2005.
 14. Woo-Jin Lee, H. Okada, A. Wakahara and A. Yoshida, "Structural and photoelectrochemical characteristics of nanocrystalline ZnO electrode with Eosin-Y", *Ceramics International*, 32, pp. 495-498, 2006.
 15. 박남규, "염료감응 태양전지", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 15, 3, pp. 265-277, 2004.
 16. M. Grätzel, "Dye-sensitized solar cell", *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4, pp. 145-153, 2003.
 17. 황문식, 마재평, TCO층에 따른 염료감응형 태양전지의 특성, *대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집 II*, pp. 759-760, 2007.
 18. R. Hattori and H. Goto, Carrier leakage blocking effect of high temperature sputtered TiO₂ film on dye-sensitized mesoporous photoelectrode, *Thin Solid Films*, 515, pp. 8045-8049, 2007.
 19. 송양기, 황문식, 공대영, 마재평, 차단층에 따른 염료감응형 태양전지의 특성, *하계종합학술대회논문집*, 31권, 제1호, CFP-116, pp.381-382, *대한전자공학회*, 2008.
-
- 접수일: 2011년 5월 6일, 1차심사일: 2011년 5월 23일,
2차심사일: 2011년 6월 7일, 게재확정일: 2011년 6월 15일