

플렉시블 염료 감응형 슬리셀의 효율에 미치는 Indium Zinc Oxide 투명전극의 영향

이도영 · 정지원[†]

인하대학교 화학공학과
402-751 인천시 남구 용현동 253
(2008년 10월 9일 접수, 2008년 12월 23일 채택)

Effect of Indium Zinc Oxide Transparent Electrode on Power Conversion Efficiency of Flexible Dye-Sensitized Solar Cells

Do Young Lee and Chee Won Chung[†]

Department of Chemical Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea
(Received 9 October 2008; accepted 23 December 2008)

요 약

Indium zinc oxide($\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, IZO) 박막이 poly(ethylene terephthalate) 플렉시블 기판위에 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Ar/ O_2 혼합 가스하에서 rf power, 공정압력 및 IZO 두께를 변화하여 증착되었다. 공정압력이 증가됨에 따라 증착속도는 약간씩 증가되었고 투과도에는 거의 변화가 없었으나 저항도는 증가되었다. rf power의 증가에 대하여는 증착속도가 크게 증가하였고 투과도는 미소한 변화를 보였으며 저항도는 최저점을 보인 후에 증가하였다. 가장 낮은 저항을 보인 1 mTorr와 90 W의 공정조건에서 IZO 박막의 두께변화를 실시하여 최적의 두께를 찾고자 하였다. 1,500 Å 두께의 IZO 박막이 가장 낮은 저항도를 나타냈고 염료의 최대흡수 파장영역 주변에서 높은 투과도를 보였다. 두께가 다른 투명전극들을 이용하여 제조된 태양전지의 에너지 변환효율을 측정 한 결과, 1,500 Å 두께의 IZO 전극을 사용한 셀에서 2.88%의 최대 변환효율을 보였다.

Abstract – IZO thin films have been deposited on poly(ethylene terephthalate) flexible substrate under varying radio frequency (rf) power, process pressure and thickness of IZO films using rf magnetron sputtering under Ar/ O_2 gas mix. As the process pressure increased, the deposition rate was slightly increased and the transmittance showed little change, but the resistivity was increased. With increasing rf power, the great increase in deposition rate was observed but the transmittance showed a slight change only, and the resistivity was decreased. In addition, an attempt was made to find the optimal thickness of IZO films under varying the thickness of IZO films at the process conditions of 1 mTorr pressure and 90 W rf power, which showed lowest resistivity. IZO thin films with the thickness of 1,500 Å showed lowest resistivity and also showed highest transmittance around the wavelength zone of the maximum absorption. The power conversion efficiency of solar cells fabricated using various transparent electrodes with different thicknesses were measured and the solar cell with IZO electrode of 1,500 Å showed the maximum conversion-efficiency of 2.88 %.

Key words: Flexible Dye-sensitized Solar Cell, Indium Zinc Oxide, rf Magnetron Sputtering, Poly(Ethylene Terephthalate) Substrate

1. 서 론

현재 지구상에서 소모되는 에너지의 대부분은 화석연료로서 이의 점차적인 고갈로 인하여 새로운 에너지원이 대체되어야 한다. 지구의 온난화와 미래의 환경문제의 관점에서 새로운 대체에너지는 기존의 석탄, 석유 및 원자력 중심의 에너지보다는 신재생에너지여야 한다. 신재생에너지는 대부분 자연력에 의존하며 이들의 종류로는 태양광, 풍력, 지열, 조력 등이 있다. 그 중에서도 미래의 에너지문

제와 환경문제를 극복할 수 있는 차세대 에너지원으로서 태양열을 이용하는 태양전지는 시간이 갈수록 그 중요성을 더해가고 있다[1-3].

태양전지의 종류에는 실리콘을 이용하는 태양전지, 화합물을 이용하는 화합물 태양전지 그리고 유기물을 이용하는 염료감응형 및 유기고분자 태양전지 등이 있다. 이 가운데서 염료감응형 태양전지는 1991년 Gratzel 그룹에 의하여 약 11% 이상의 최대 에너지 변환효율을 보이며 저비용과 단순공정의 장점에 의하여 차세대 태양전지의 후보로서 지난 10년간 많은 관심을 받아왔다. 최근에는 염료 감응형 태양전지의 성능을 높이기 위하여 투명전극재료, 반도체 입자, 염료, 전해질 등의 염료 감응형 태양전지를 구성하는 여러 부분들

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: cwchung@inha.ac.kr

이 상호 연관이 되어져 연구가 진행되고 있다. 그 가운데서 광에너지 효율적으로 투과시키고 전자를 모으거나 이동시키는 전달 매체로서 투명전극의 성능개선이나 새로운 투명전극에 대한 연구도 활발히 연구되고 있다 [4-9].

일반적으로 염료 감응형 태양전지의 투명전극으로는 fluorine-doped tin oxide(FTO)가 사용되고 있다. 최근에 플렉시블한 태양전지에 많은 관심과 주목이 집중되면서 플렉시블 기판을 이용한 염료 감응형 태양전지의 연구 및 개발이 진행중에 있다. 이러한 플렉시블 기판을 사용하는 염료 감응형 태양전지의 제조에 있어서는 고온의 열처리공정이 불가하기 때문에 저온에서 증착 가능한 투명전극과 저온 공정하에서 낮은 저항도를 보이는 새로운 투명전극이 필요하다. 기존의 indium-doped tin oxide와 FTO 투명전극들은 고온의 증착공정 및 고온의 열처리 공정하에서 낮은 저항도를 보이지만 저온에서는 투명전극의 저항도가 높게 되는 특징이 있기 때문에 저온공정이 필요한 플렉시블 염료감응형 태양전지에서는 사용이 제한되어 있다. 최근에 연구가 활발히 진행되고 있는 indium zinc oxide ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, IZO) 박막은 가시광선 영역 안에서 높은 전기전도도와 투과율 때문에 유망한 투명전극 소재로 주목 받고 있으며 또한 IZO는 증착시 고온공정이 필요없으며 증착 후에도 고온의 열처리 공정이 필요없이 매우 낮은 저항도를 보인다. 따라서 플라스틱을 포함하는 유연한 기판에 사용이 가능한 장점이 있다[7,8,10,11]. 현재 염료감응형 태양전지는 TiO_2 의 분산시 사용된 용매의 제거와 TiO_2 사이의 응집력을 높이기 위하여 고온의 열처리 공정이 필요로 한다. 그러나 플렉시블한 기판을 사용할 때는 고온의 공정이 사용될 수 없기 때문에 본 연구에서는 UV/ozone 처리 공정을 적용하여 염료 감응형 태양전지를 제조하였다.

본 연구에서는 플렉시블 기판을 사용하는 염료 감응형 태양전지의 제조에 적용하기 위하여 새로운 IZO 전극의 증착공정 및 최적의 증착조건 등에 대하여 조사하고자 한다. 증착 압력, rf power 및 전극 박막의 두께가 제조되는 플렉시블한 염료 감응형 태양전지의 특성 및 효율에 미치는 영향을 고찰하여 최적의 증착조건을 살펴보고자 한다.

2. 실험

IZO 박막은 In_2O_3 와 ZnO 가 9:1의 무게비로 구성된 IZO 타겟을 장착한 radio frequency(rf) reactive magnetron sputtering 시스템(A-Tech system, 한국) (Fig. 1)을 이용하여 증착되었다. 스퍼터링 가스로는 Ar/O_2 의 혼합가스를 사용하였고 기판으로는 poly(ethylene terephthalate) (PET)가 사용되었다. 스퍼터링 장비는 증착 챔버와 loadlock 챔버로 구성되어 있으며 증착 챔버내의 base pressure는 5.0×10^{-7} Torr로 유지되어 고진공에서 우수한 특성의 박막을 증착할 수 있었다. 기판과 타겟과의 거리는 7 cm로 유지되었으며 증착온도는 상온에서 진행되었다. 최적의 IZO 박막의 물성을 조사하기 위해서 증착 압력은 1, 3 그리고 5 mTorr로 변화되었으며 타겟에 인가되는 rf power는 30, 60, 90 W로 변화하여 증착이 수행되었다. 또한 IZO 투명전극의 최적 두께를 조사하기 위하여 두께를 1,000 Å, 1,250 Å, 1,500 Å 그리고 1,750 Å으로 변화하여 IZO 박막이 증착되었으며 증착된 박막의 분석방법으로 박막의 증착속도, 투과도, 저항도 및 표면거칠기(surface morphology)가 조사되었으며 최종적으로 태양 전지를 제조하여 광에너지 변환효율을 측정하였다.

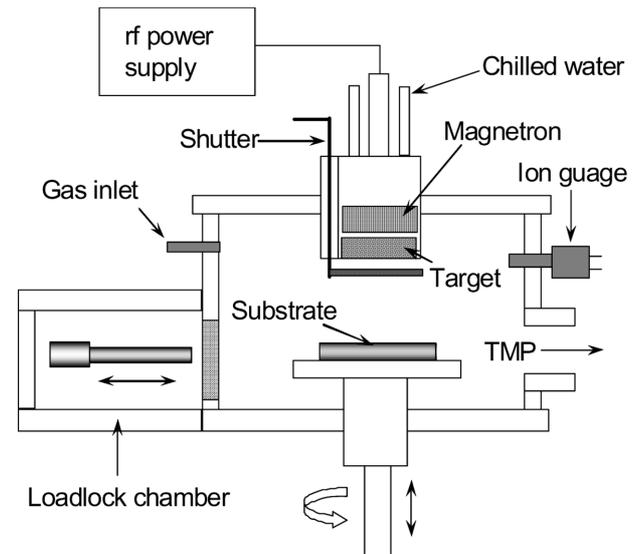


Fig. 1. Schematic of rf magnetron sputtering system.

다음 단계는 TiO_2 paste의 제조와 TiO_2 paste를 투명전극 위에 코팅시키는 것이다. TiO_2 paste는 TiO_2 powder(Degussa P25), polyethylene glycol(PEG), 에탄올, acetylacetonate(AcAc), acetic acid 및 증류수를 사용하여 agate mortar 안에서 제조되었다. 이렇게 제조된 TiO_2 paste는 doctor blade 방법을 이용하여 플렉시블 PET 기판위에 코팅되었으며 증착된 TiO_2 박막내의 유기물들을 제거하기 위하여 저압 수은램프를 사용하여서 24시간 동안 시료를 조사하였다[12, 13]. 그 후 Ruthenium 화합물(N719)과 에탄올 용액을 혼합한 염료 용액 안에 24시간 동안 TiO_2 전극을 넣어서 TiO_2 박막내에 염료가 골고루 스며들도록 하였다. 이렇게 제조된 TiO_2 전극(working electrode)과 Pt가 증착된 counter electrode 사이에 전해질용액(Solaronix, Iodolyte MPN-100)이 새지 않게 하기 위해서 hot melt sealing foil(Solaronix, SX1170-60 spacer)을 이용하여 전극들을 부착시키고 클램프를 사용하여 두 전극을 눌러 압착시켰다. 마지막단계로서 두 전극 사이를 전해질로 채운 후에 제조된 전지의 효율을 측정하였다.

증착된 IZO 박막의 투과도와 저항도는 UV-Visible spectrometer (Perkin Elmer, Lambda 40)와 four-point probe(Loresta-GP)를 사용하여 각각 측정되었으며 박막의 두께는 Alpha-step(Tencor P-1, U.S.A)을 이용하여 측정되었다. 또한 박막의 표면거칠기는 atomic force microscope(NS4A)를 이용하여 관찰되었다. 광에너지 변환 효율은 solar simulator(Oriel solar simulator, Model : 91160-1000)을 이용하여 AM 1.5(100 mW/cm²)의 광원하에서 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

스퍼터링 증착방법에 의하여 IZO 박막을 증착할 경우에는 타겟의 종류, 스퍼터링 가스의 종류 및 농도, 타겟에 인가되는 rf power, 기판과 타겟간의 거리, 공정 압력 그리고 증착 온도 등의 많은 변수들에 의하여 IZO 박막의 특성이 변하는 것으로 알려져 있다[14, 15]. 본 연구에서는 타겟에 인가되는 rf power의 변화와 공정 압력의 공정 변수와 박막의 두께를 변화하여 최적의 증착조건 및 박막의 두께를 조사하여 최종적으로 제조되는 염료 감응형 태양전지의 에너지 변환효율에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

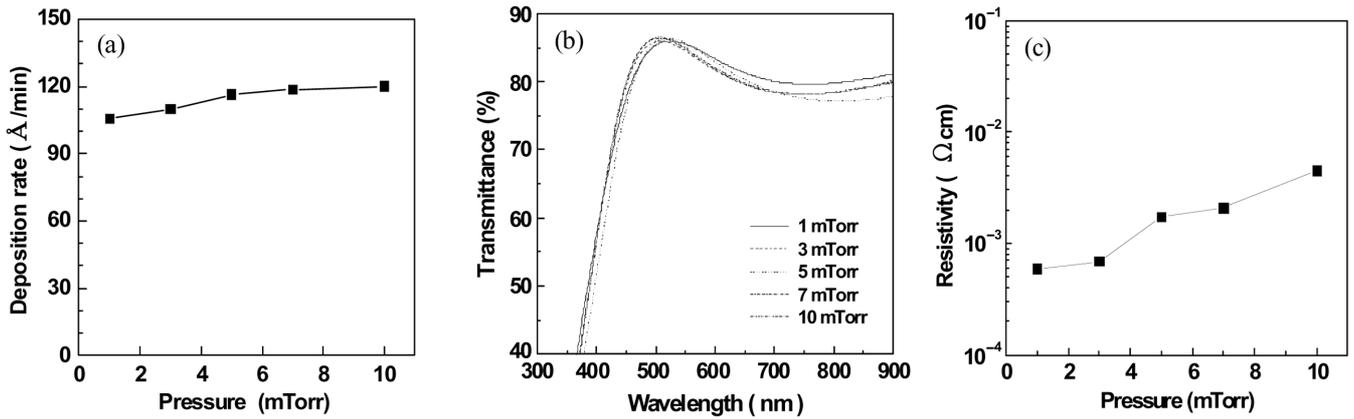


Fig. 2. (a) Deposition rate of IZO thin films for the variation of process pressure, (b) Transmittance of IZO thin films for the variation of process pressure, (c) Resistivity IZO thin films for the variation of process pressure.

공정압력에 따른 IZO 박막의 물성들이 Fig. 2에 보여진다. 공정 압력이 1, 3, 5, 7 그리고 10 mTorr로 증가함에 따라서 증착속도는 매우 미소하게 증가하는 경향을 보인다(Fig. 2(a)). 이는 공정압력이 증가함에 따라서 플라즈마의 밀도가 증가하여 생성되는 Ar 이온의 양이 증가하여 타겟으로의 스퍼터링 효과가 증가하여 증착속도의 증가에 긍정적인 영향을 미치나 한편으로 압력의 증가에 따른 챔버 내의 입자들의 평균자유행로(mean free path)의 감소로 인하여 즉 입자들 상호간의 충돌현상이 증가하여 증착속도의 증가에 부정적인

효과가 공존하여 결과적으로 증착속도의 미미한 증가가 관찰되는 것으로 해석된다. 또한 공정 압력의 증가에 대한 박막 투과도의 변화도 거의 관찰되지 않는다(Fig. 2(b)). 그러나 Fig. 2(c)에 보이듯이 공정 압력의 증가에 대하여 박막의 저항도는 증가하는 경향이 관찰되고 특히 5 mTorr의 압력 이상에서는 급격히 증가하는 결과를 보이는 데, 이는 높은 공정압력에서 플라즈마 밀도가 증가함에 따라서 Ar 이온 뿐만 아니라 스퍼터링 가스 내에 소량 포함되어 있는 산소 라디칼의 양도 동시에 증가하여 증착되는 IZO 박막 내부에 포

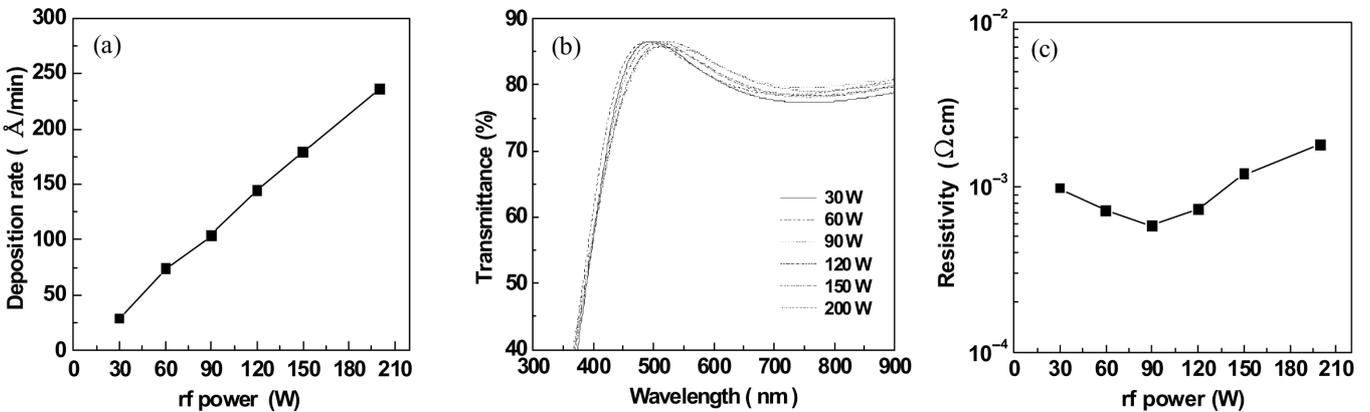


Fig. 3. (a) Deposition rate of IZO thin films for the variation of rf power, (b) Transmittance of IZO thin films for the variation of rf power, (c) Resistivity of IZO thin films for the variation of rf power.

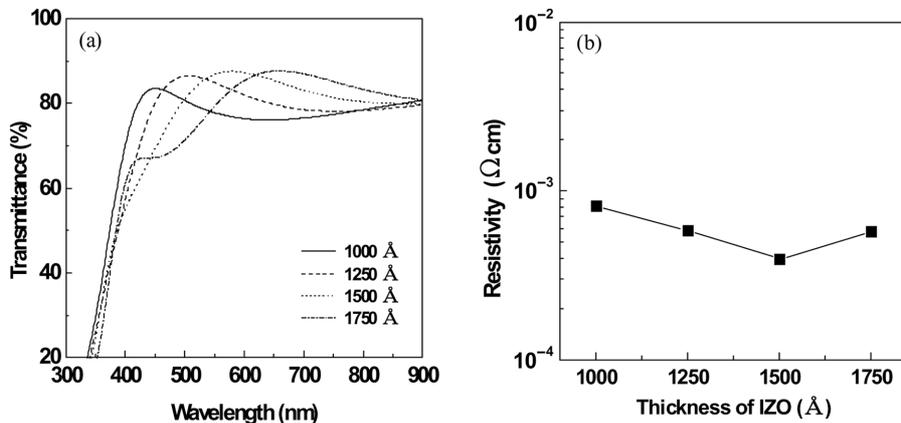


Fig. 4. (a) Transmittance of IZO thin films for the variation of film thickness, (b) Resistivity of IZO thin films for the variation of film thickness.

함되어, 즉 산소가 풍부한 IZO 박막이 증착되어 저항도가 증가하는 결과로 이해된다.

Fig. 3은 rf power 변화에 따른 IZO 박막의 증착속도를 보여준다. 타겟에 인가되는 rf power가 30 W에서 90 W로 증가함에 따라서 증착속도가 평균 28.9 Å/min에서 103.8 Å/min로 증가하였으며 그 이후 200 W의 rf power에서는 235 Å/min의 증착속도를 나타내며 선형적으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3(a)). 이는 rf power가 증가할수록 플라즈마 밀도가 증가하게 되고 그 결과로서 타겟에 충돌하는 Ar 양이온이 증가함에 따라서 타겟으로부터 스퍼터링되는 IZO 입자의 양이 증가하여 기판위에 형성되는 박막의 증착속도가 증가하는 것으로 사료된다. Fig. 3(b)는 rf power 변화에 따른 IZO 박막의 투과도를 보여준다. rf power의 변화에 대하여 박막의 투과도는 큰 변화를 보이지 않으며 단지 최대 투과도를 보이는 파장이 미소

한 증가를 보였다. 공정압력의 변화에서와 같이 rf power 변화에 대한 IZO 박막의 투과도는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 rf power 변화에 대한 IZO 박막의 저항도를 나타낸 그래프로서 90 W의 rf power까지는 저항이 감소하지만 그 이후부터는 오히려 저항도가 증가하는 결과를 보여준다. 타겟에 인가된 rf power가 증가할수록 스퍼터링에 의하여 기판에 도달하는 IZO 입자의 양과 그 속도가 증가하여 저항도가 낮은 양질의 박막이 형성되지만 rf power가 과도하게 증가하면 오히려 챔버내의 O₂가스의 해리도 증가하여 증착되는 박막의 저항을 높이는 결과를 초래하기 때문으로 고찰된다.

위의 결과로부터 가장 낮은 저항도를 나타내는 증착조건인 1 mTorr의 공정압력과 90 W의 rf power로 증착조건을 고정시킨 후에, 최적의 IZO 박막의 두께를 가지는 태양전지의 제조를 위해서 IZO 박막의

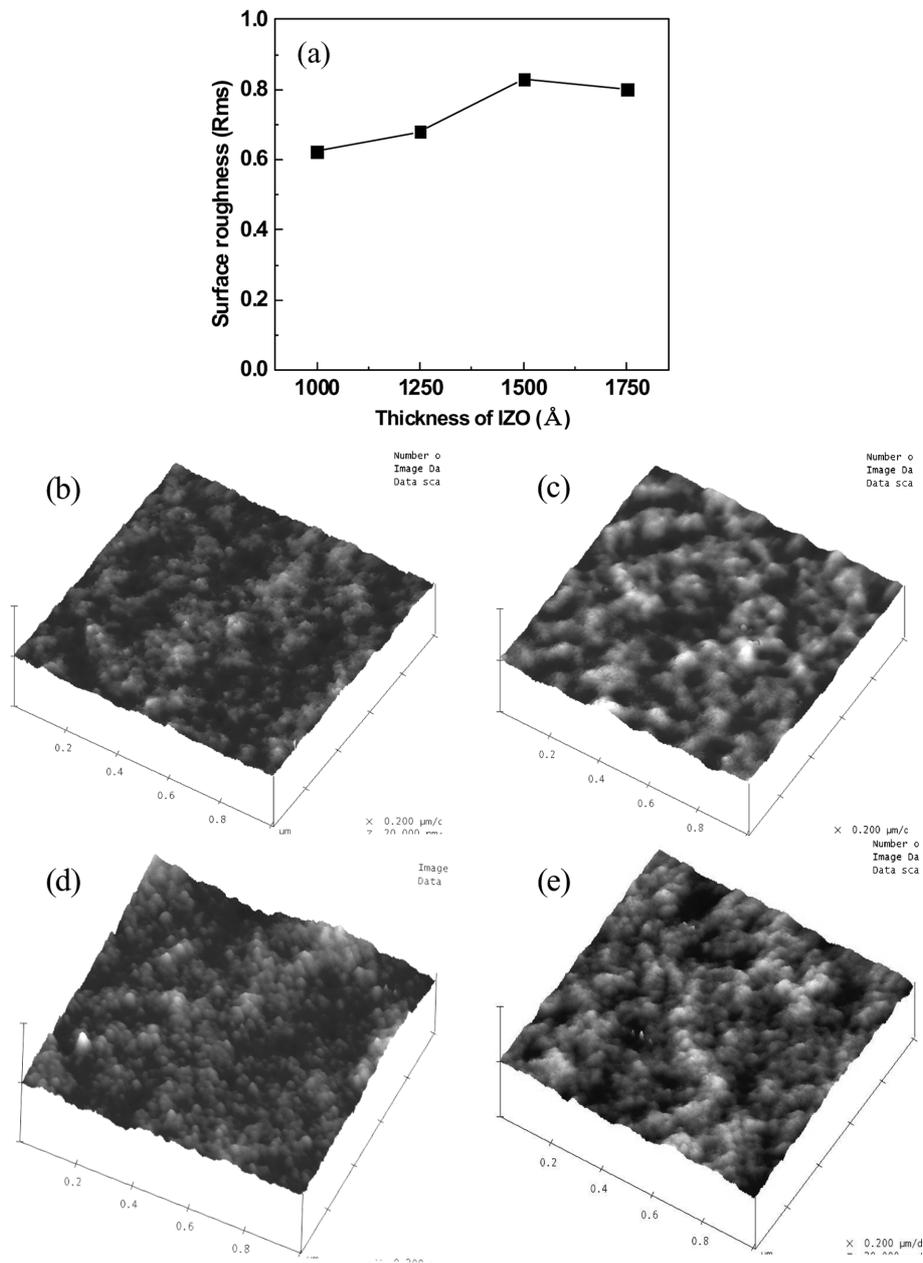


Fig. 5. (a) Surface roughness of IZO thin films for the variation of film thickness. AFM images of IZO thin films for the variation of film thickness; (b) 1000 Å, (c) 1250 Å, (d) 1500 Å, and (e) 1750 Å.

두께를 변화시켜서 증착을 하였다. Fig. 4(a)와 4(b)는 IZO 박막의 두께변화에 대한 투과도 및 저항도의 변화를 나타내었다. 박막의 두께가 1,000 Å, 1,250 Å, 1,500 Å, 그리고 1,750 Å로 증가함에 따라서 각 박막의 최대 투과도는 약 90% 정도로 비슷한 투과율을 나타내었으나 최대 흡수파장은 박막의 두께가 증가할수록 좀 더 긴 파장쪽으로 변화하였다. 이러한 흡수단의 변화는 Burstein-Moss 효과 [16]로 알려진 낮은 에너지전이의 차단을 발생시키는 박막의 전도도가 증가함에 따라서 발생할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 염료(N719, Solaronix)의 빛에 대한 최대흡수 지점인 535 nm 부근에서 최대 투과도를 나타낸 박막의 두께는 1,250 Å과 1,500 Å임이 확인되었다. 한편, Fig. 4(b)의 저항도의 변화를 살펴보면 1,500 Å의 박막의 저항도가 1,250 Å의 저항도보다 낮은 것이 관찰되었다. 증착되는 IZO 박막의 두께 변화에 대한 표면 상태와 투과도 및 저항도의 상관관계를 조사하기 위하여 AFM 관찰이 실행되어 Fig. 5에 보여진다. 박막의 두께가 증가함에 따라서 표면의 거칠기는 증가하는 경향을 나타냈으나 박막의 결정도와 결정의 크기와는 상관관계가 없는 것으로 이해된다. 또한 박막의 투과도와 저항도의 변화도 박막의 표면상태와 무관한 것으로 해석된다.

최종적으로 박막의 두께가 다른 투명전극들을 이용하여 태양전지를 제조하였으며 이에 대한 에너지 변환효율이 측정되어 Fig. 6에 측정결과가 주어지며 상세한 데이터가 Table 1에 제시된다. 박막의 두께가 증가할수록 에너지 변환효율이 증가하여 1,500 Å에서 2.88%의 최대값을 보였으며 1,750 Å의 두께에서는 오히려 효율이 감소하는 결과가 초래되었다. 1,500 Å 두께의 투명전극으로 제조된 전지는 0.75 V의 개방전압, 6.57 mA/cm²의 단락전류밀도, 0.583의 채움인자(fill factor)의 특성을 보였으며 이러한 결과는 두께 변화의 실험 결과로부터 얻어진 데이터로부터 예상할 수 있듯이 최대의 투과도와 최저의 저항도를 나타낸 조건에서 최대의 에너지 변환효율이 얻어지는 것이 조사되었다. 1,500 Å의 두께로 증착된 IZO 투명전극

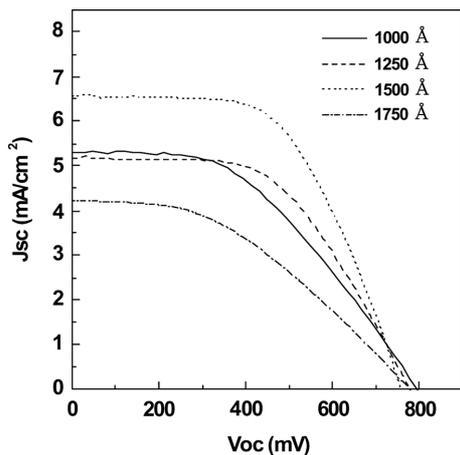


Fig. 6. Efficiency of DSSCs fabricated with different IZO thicknesses.

Table 1. Performance characteristics of DSSCs fabricated with different IZO thicknesses

IZO on PET	Jsc(mA/cm ²)	Voc(mV)	FF(%)	Efficiency(%)
1000Å	5.31	795.4	45.33	1.91
1250Å	5.18	766.3	54.72	2.17
1500Å	6.57	751.8	58.28	2.88
1750Å	4.23	772.9	42.10	1.38

을 이용한 셀에서 2.88%의 최대효율이 얻어짐으로서 본 연구의 조건에서는 1,500 Å의 투명전극, 1 mTorr의 공정 압력 및 90 W의 rf power가 최대의 에너지 변환효율을 위한 최적의 조건인 것이 확인되었다.

그러나 본 연구에서 얻어진 에너지 변환효율은 유리기판을 사용하고 고온 열처리 공정을 적용하여 제조되는 일반적인 염료 감응형 태양전지의 에너지 전환효율인 5~8%보다 다소 낮은 전환효율이지만 본 연구에서의 플렉시블 기판인 PET를 사용하고 고온열처리를 적용하지 않은 염료감응형 태양전지의 측면에서는 타당한 전환효율이라 생각된다. 향후 고온 공정이 적용될 수 없는 플렉시블한 플라스틱 기판을 사용하는 염료 감응형 태양전지의 효율의 증가를 위하여 새로운 투명전극의 개발 및 증착조건, TiO₂ 입자의 제조방법 그리고 새로운 셀의 제조방법들이 개발되어야 할 것이다.

4. 결 론

IZO 투명전극이 rf magnetron sputtering 방법을 이용하여 플렉시블 기판인 PET 위에 Ar/O₂ 혼합가스를 사용하여 상온에서 증착되었다. 공정압력과 rf power를 변화시켜서 최적의 증착조건을 찾자 하였고 투명전극의 두께를 변화시켜 염료 감응형 태양전지를 제조함으로써 박막두께의 영향을 조사하고자 하였다. 공정압력이 1 mTorr에서 10 mTorr로 증가함에 따라서 증착속도는 미소하게 증가하였고 투과도의 변화는 거의 관찰되지 않았으며 저항도는 증가되는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 압력의 증가에 따른 스퍼터링의 증가와 입자들의 산란의 증가가 상호보완적으로 작용한 결과로서 증착속도의 변화는 미미하였다. 그러나 압력의 증가에 따른 플라즈마 밀도의 증가에 의한 산소 라디칼의 증가로 IZO 박막의 저항도는 증가된 것으로 해석된다. rf power가 30 W에서 200 W로 증가함에 따라서 증착속도는 매우 큰 폭으로 증가되었으며 투과도의 변화는 미미하였고 박막의 저항도는 최저점을 보이다가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 rf power의 증가에 따라서 플라즈마의 밀도가 증가하여 스퍼터링 효과가 증가하여 증착속도가 증가한 것으로 해석되며 이러한 스퍼터링의 증가는 양질의 박막의 제조에 기여하여 저항도가 낮은 IZO 전극이 형성되는 것으로 사료된다. 그러나 90 W 이상의 높은 rf power에서는 오히려 저항도가 증가하는 결과를 초래하였다.

박막의 두께 변화에 대하여 투과도는 매우 민감하게 반응하여 두께가 증가함에 따라서 최대흡수 파장영역이 증가하는 것이 관찰된다. 그리고 1,500 Å의 두께에서 최저의 저항도를 나타내었는데 이러한 결과는 아직 정확히 이해되지 않고 있다. 그러나 최종적으로 최적의 증착조건인 90 W와 1 mTorr의 공정조건에서 투명전극의 두께를 변화시켜 셀을 제조하여 에너지 변환효율을 측정한 결과, 염료의 최대흡수파장 영역에서 높은 투과도를 나타내고 가장 낮은 저항도를 보인 1,500 Å의 투명전극에서 최대 2.88%의 변환효율이 얻어졌다.

참고문헌

1. Shah, A., Torres, P., Tscharnner, R., Wyrsh, N. and Keppner, H., "Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells," *Science*, **285**(5428), 692-698(1999).
2. Park, N. G., "Dye-Sensitized Solar Cell," *J. Ind. Eng. Chem.*, **15**(3),

- 265-277(2004).
3. Glunz, S. W., "New Concepts for High-Efficiency Silicon Solar Cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **90**, 3276-3284(2006).
 4. Dai, S. Y. and Wang, K. J., "Optimum Nanoporous TiO₂ Film and Its Application to Dye-sensitized Solar Cells," *Chin. Phys. Lett.*, **20**(6), 953-955(2003).
 5. Longo, C., Freitas, J. and Paoli, M.-A. D., "Performance and Stability of TiO₂/dye Solar Cells Assembled with Flexible Electrodes and a Polymer Electrolyte," *J. Photoch. Photobio. A.*, **159**(1), 33-39(2003).
 6. Wang, P., Klein, C., Baker, R. H., Zakeeruddin, S. M. and Gratzel, M., "A High Molar Extinction Coefficient Sensitizer for Stable Dye-Sensitized Solar Cells," *J. Am. Chem. Soc.*, **127**(3), 808-809(2005).
 7. Li, Y. L., Cho, H. N., Min, S. R. and Chung, C. W., "Optical and Electrical Properties of RF-Sputtered Indium Zinc Oxide Films," *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**(5), 777-780(2007).
 8. Fortunato, E., Ginley, D., Hosono, H. and Paine, D. C., "Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics," *MRS Bulletin*, **32**, 242-247(2007).
 9. Calnan, S., Hupkes, J., Rech, B., Siekmann, H. and Tiwari, A. N., "High Deposition Rate Aluminum-Doped Zinc Oxide Films with Highly Efficient Light Trapping for Silicon Thin Film Solar Cells," *Thin Solid Films*, **516**, 1242-1248(2008).
 10. Cho, H. N., Li, Y. L., Min, S. R. and Chung, C. W., "Effect of O₂ Concentration and Annealing Temperature on the Characteristics of Indium Zinc Oxide Thin Films," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**(6), 644-670(2006).
 11. Tauste, D. G., Zumeta, I., Vigil, E., Fenollosa, M. A. H., Demenech, X. and Ayllon, J. A., "New Low-Temperature Preparation Method of the TiO₂ Porous Photoelectrode for Dye-Sensitized Solar Cells Using UV Irradiation," *J. Photoch. Photobio. A.*, **175**(2-3), 165-171(2005).
 12. Zhang, D. S., Yoshida, T., Oekermann, T., Furuta, K. and Minoura, H., "Room-Temperature Synthesis of Porous Nanoparticulate TiO₂ Films for Flexible Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, **16**(9), 1228-1234(2006).
 13. Vink, T. J., Walrave, W. J., Daams, L. C., Baarslag, P. C. and van den Meerakker, J. E. A. M., "On the Homogeneity of Sputter-Deposited ITO Films Part I. Stress and Microstructure," *Thin Solid Films*, **266**(2), 145-151(1995).
 14. Pan, H. C., Shiao, M. H., Su, D. Y. and Hsiao, C. N., "Influence of Sputtering Parameter on the Optical and Electrical Properties of Zinc-Doped Indium Oxide Thin Films," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **23**(4), 1187-1191(2005).
 15. Song, Y. S., Park, J. K., Kim, T. W. and Chung, C. W., "Influence of Process Parameters on the Characteristics of Indium Zinc Oxide Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering," *Thin Solid Films*, **467**(1-2), 117-120(2004).
 16. Roth, A. P., Webb, J. B. and Williams, D. F., "Band-Gap Narrowing in Heavily Defect-Doped ZnO," *Phys. Rev. B*, **25**(12), 7836-7839(1982).