

ITO/p-InP 태양전지 제작

논문
7-3-9

The Fabrication of ITO/p-InP Solar Cells

맹 경 호^{*}, 김 선 태^{**}, 송 복 식^{***}, 문 동 찬^{***}
Kyung-ho Maeng, Seon-tai Kim, Bok-sik Song, Dong-chan Moon

Abstract

ITO(Indium Tin Oxide) film with thickness of 1500Å was prepared by an e-beam evaporator onto a glass and a p-type InP wafer ((100) LEC grown Zn-doped $p=2.3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$), in which the components of ITO used for evaporation source were hot pressed pellets 1 mole% In_2O_3 +9 mole% SnO_2 , and evaporated in O_2 ambient.

The optimum conditions to preparation of ITO thin film were the substrate temperature of 350°C, the injected oxygen pressure of 2×10^{-4} torr, and the evaporation speed of 0.2-0.3 Å/sec, respectively. In these optimum conditions, the resistivity and the carrier concentration were $5.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$, $6.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, and the transmittance was over 80%.

From the results of J-V measurements in ITO/p-InP structure solar cells, the higher pressure of injected oxygen, the more open circuit voltage. The efficiency of ITO/p-InP solar cell without the grid line contact, prepared by the optimum evaporation conditions, was 7.19%. By using the grid line contact, the efficiency, the open circuit voltage, the short circuit current density, the fill factor, the series resistance, and the shunt resistance were 8.5%, 0.47V, 29.48 mAcm^{-2} , 61.35%, 3Ω , and 26.6k Ω , respectively.

Key Words(중요용어) : ITO(인듐 주석 산화물), Solar Cells(태양전지), Open Circuit Voltage(개방회로전압), Short Circuit Current Density(단락전류밀도), Efficiency(효율).

1. 서 론

ITO(Indium Tin Oxide) 박막은 가시광선 영역에서의 높은 투과율, 적외선 영역에서의 높은 반사율, 낮은 비저항, 좋은 기관 접착성 등 다방면에서 우수한 특성을 갖는 도전성 투과막으로써, 태양전지의 투명전극, 적외선 반사막 등에 광범위하게 사용되고 있다. 최근에는 LCD(Liquid Crystal Display), ELD(Electroluminescent Display), ECD(Electrochromic Display)등의 디스플레이 소자의 대면적화에 따라, 보다 낮은 비저항을 갖는 ITO 박막을 필요로 하고 있다. 이러한 ITO 박막의 제작에는 evaporation^{1,2)}, reactive evaporation^{2,4)}, nonrea-

ctive sputtering^{5,6)}, reactive sputtering^{7,8)}, CVD(chemical vapor deposition)^{9,10)}등에 의한 방법들이 연구되어 왔으며, Hamberg³⁾등은 이 중 reactive evaporation 방법으로 ITO 박막을 제작하여 sputtering방법에 의한 것과 필적할만한 우수한 특성을 보고하였고, 이 방법의 응용 가능성을 제시하였다.

InP는 상온에서 1.34eV의 직접전이형 에너지밴드 구조를 갖는 III-V족 화합물 반도체로 태양에너지의 변환에 적합하며¹¹⁾, 에너지 갭 이상의 빛 에너지에 대해 1 μm 이하의 작은 흡수거리를 갖기 때문에 이론적 효율 24%로 보고되고 있다.¹²⁾ 이러한 InP를 기관으로한 태양전지는 우수한 내방사성과 높은 효율로, 최근 우주공간에서의 응용에 그 중요성이 부각 되고 있다.¹³⁾ 특히 낮은 비저항과 넓은 에너지 갭을 갖는 ITO를 전도성 윈도우 층(conducting window layer)으로 사용한 ITO/p-InP 이종접합(heterojunction) 태양전지는 높은 효율뿐 아니라 우수한 내방사성 측면에서도 다른 InP 태양전지 이상의 특성이 보고된 바 있다.¹⁴⁾

* : (주)포스코 홀스

** : 대전산업대학교 재료공학과

*** : 광운대학교 전자재료공학과

접수일자 : 1993년 8월 4일

심사완료 : 1994년 4월 30일

S. Harsha¹⁵⁾ 등은 ITO/p-InP 태양전지를 ion beam을 사용하여 제작해 14.4%의 효율을 얻었고, T.J. Coutts와 S. Naseem¹⁶⁾은 rf sputtering을 사용하여 16.2%의 효율을 얻었다. Li등은¹⁷⁾ 수소와 산소를 아르곤 가스와 배합하여 분위기 기체로 사용한 DC magnetron sputtering 방법으로 18.4%의 높은 효율을 얻었다. 그러나 아직까지도 ITO/p-InP 소자의 접합형태에 대한 정확한 메카니즘은 불분명한 상태로 SIS(semiconductor-Insulator-Semiconductor) 모델¹⁸⁻²¹⁾과 매몰 동종접합(buried homojunction) 모델^{21,22)} 등이 제안되고 있다.

본 연구에서는 e-beam을 이용한 반응성 증착(reactive evaporation) 방법으로 ITO 박막을 제작하고, 전기 광학적 특성 조사를 통해 최적 증착조건을 조사한 후 ITO/p-InP 태양전지를 제작하였다. p-InP 기판으로는 이미 보고된 바 있는 최적농도($p=3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)에¹⁶⁾ 가까운 값인 $p=2.3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ InP 웨이퍼를 사용하였으며, 기하학적 면적 손실율이 약 13%인 그리드 라인(grid line)은 스텐레스 스틸 판을 광식각(photo lithography)한 패턴을 마스크로 사용하여 제작하였다. 제작된 태양전지의 전류밀도-전압 특성을 통해 증착조건과 광기전력 현상과의 관계를 고찰하였고, 병렬 및 직렬저항등을 측정하였다.

2. 실험

2.1 ITO 박막 제작

ITO 박막의 전기 광학적 특성을 위한 기판은 현미경 유리(76mm×26mm×13mm, Gluei Co.)를 사용하였으며, 증성세제로 씻어낸 후, 증류수, 삼염화에틸렌, 아세톤, 메탄올로 세척한 후 건조시켰다. 이때 기판은 투과도와 흡-효과 측정을 위하여 각각 직사각형과 클로버 형태의 두 가지를 사용하였다.

준비된 두개의 기판을 전자빔 증착기(Electron-Beam Evaporator ; Anelva co. VI-43)의 기판 고정대에 놓고 먼저 10^{-6} torr로 진공 배기한 후 산소를 연속적으로 주입하며, 1mole% In₂O₃+9mole% SnO₂ 성분의 분말을 고온 가압(hot pressed)한 펠릿(pellet)을 사용하여 0.2-0.3Å/sec의 증착 속도로 증착하였다. 이때 진공 게이지 상에 나타나는 주입 산소압을 $0-3 \times 10^{-4}$ torr로, 기판 온도는 100-350°C로 증착조건을 변화시켰으며 talystep으로 측정된 결과적인 ITO 박막의 두께는 1500Å이었다.

태양전지 제작을 위한 기판은 p-InP 웨이퍼(100) LEC grown Zn doped $p=2.3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)를 사용하였으며, 산화막을 제거하기 위해 HF로 에칭

한 후 Au-Zn(2%)로 후면전극을 증착하고 450°C에서 5분 동안 열처리한 뒤 다시 HF로 에칭하였다. 후면의 오염성 전극 형성은 높은 열이 수반되기 때문에 ITO/p-InP 접합의 손상을 막기 위해 ITO 증착 전에 수행하였다.

제작된 태양전지의 전면전극으로는 Al dot와 스텐레스 스틸(stainless steel)판을 광식각하여 만든 패턴을 마스크로 하여 제작한 Al 그리드 라인(grid line)을 사용하였다. ITO 박막의 최적 증착 조건 조사를 위해 각 조건에서 제작된 시료에 대해 홀 효과 및 투과도를 측정하였다. van der Pauw 방법²³⁾의 한 홀-효과를 측정하기 위해 광식각으로 제작된 패턴을 사용하여 클로버 모양의 박막을 제작한 후 네 모서리에 직경 0.3mm 크기로 Al을 증착, 열처리하여 전극을 형성하였으며, 직경 0.025mm의 금줄을 연결하여 측정용 홀더에 부착한 후 측정하였다. 투과도 및 흡수도 측정에는 자외선 분광 광도계(UV-240, Shimadzu)를 사용하였으며, 300-900nm의 파장영역에서 증착조건에 따라 측정을 수행하였다.

2.2 ITO/p-InP 태양전지의 특성 조사

제작된 태양전지의 특성을 조사하기 위하여 암상태 및 광 조사 상태의 전류밀도-전압을 측정하였다. 광원으로는 텅스텐 램프를 사용하여 파워미터로 입사강도(100mW/cm^2)를 측정한 후 태양전지 표면에 수직하게 조사시켰다. 병렬저항(R_{sh})은 태양전지에 입사되는 빛의 강도를 조금씩 증가시키며 조사하여 그 빛에서의 단락회로전류(J_{sc})와 개방회로전압(V_{oc})을 측정한 후 관계식으로 부터 식 R_{sh} 을 계산하였다. 직렬저항(R_s)은 면적법²⁴⁾과 광감도 변화법²⁵⁾으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ITO 박막의 전기 광학적 특성

반응성 증착 방법으로 증착된 ITO박막의 증착 조건에 따른 표면상태를 전자 주사 현미경으로 관찰하여 사진 1에 나타내었다. 기판온도 350°C, 주입 산소압 2×10^{-4} torr일때 약 0.2µm크기의 결정립을 보였으며 기판온도와 주입 산소압이 감소할 수록 결정립의 크기는 작아졌고 표면조직은 미세하였다.

그림 1은 주입 산소압(P_{ox})을 2×10^{-4} torr로 일정하게 유지시키면서 기판온도(T_s)를 변화 시켰을 때 ITO박막의 비저항 변화를 나타내었다. 제작된 ITO막의 비저항은 기판온도가 증가할수록 감소하였으나 기판온도 250°C 이상에서는 $1.8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$

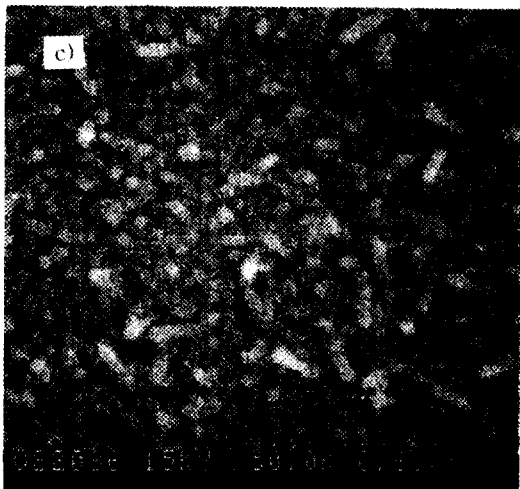
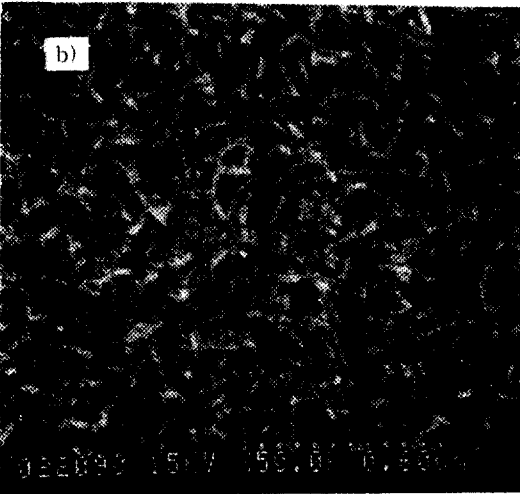
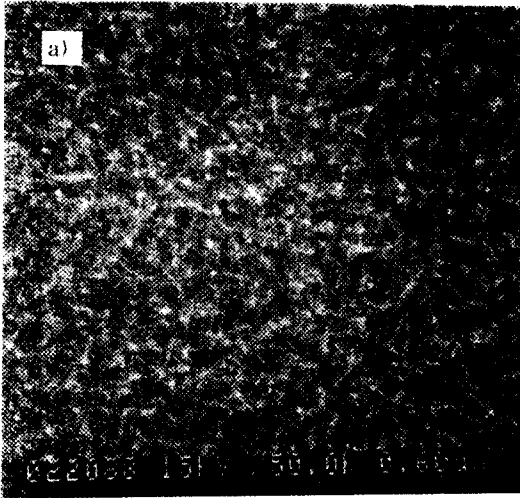


사진 1 증착조건에 따른 ITO 박막의 표면 형태.

- a) $T_s=250^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=10^{-5}$ torr;
- b) $T_s=300^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=10^{-4}$ torr;
- c) $T_s=350^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=2 \times 10^{-4}$ torr

Photo. 1 Surface morphology depending on the evaporation conditions.

- a) $T_s=250^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=10^{-5}$ torr;
- b) $T_s=300^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=10^{-4}$ torr;
- c) $T_s=350^\circ\text{C}$, $P_{\text{ox}}=2 \times 10^{-4}$ torr

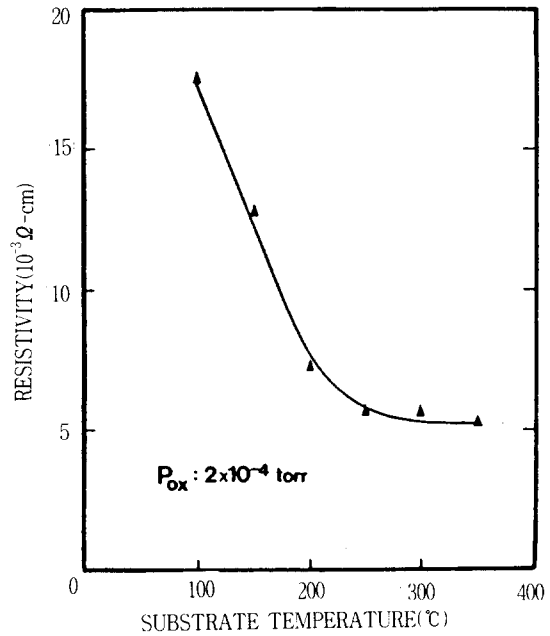


그림 1 ITO 박막의 기판온도에 따른 비저항의 변화.

Fig. 1 Variation of resistivity of ITO thin films with substrate temperature.

로 거의 불변하였다. 이러한 결과는 P. Nath 등이 보고한 결과와 잘 일치하였다.²⁶⁾ 또한 그림 2는 기판온도를 350°C로 하고 주입 산소압을 0에서 3×10^{-4} torr로 변화시켰을 때 산소압이 10×10^{-5} torr 이하에서는 캐리어농도가 약 $9.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 로 천천히 증가하였으며, 10×10^{-5} torr 이상에서는 급격히 증가하였다. 비저항은 주입 산소압에 따라 감소하였으며 이에 따라 농도는 증가하였다. 이러한 결과는 Sn/(Sn+In)의 비가 증가함에 따라 ITO자리에 Sn이 증가하여 불순물로 작용하기 때문이다.²⁷⁾ 또한, 기판온도와 주입 산소압에 따라, 도우너로 작용하는 두가지 요인인 Sn과 산소 vacancy의 변화에 의한 것으로 사료되며 결과적인 ITO 박막은 n형으로 축퇴(degenerated)되어 있었다.

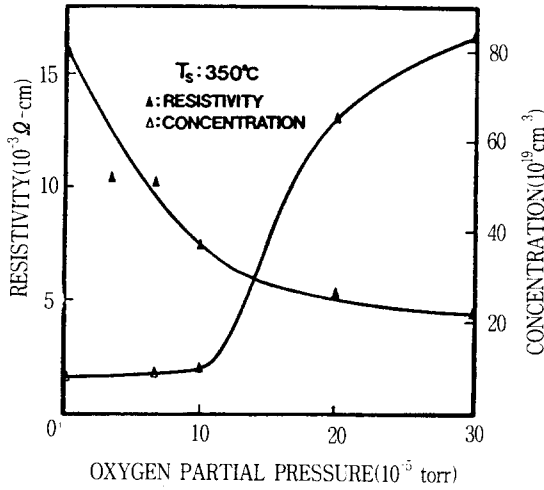


그림 2 ITO박막의 주입 산소압에 따른 비저항과 농도의 변화.

Fig. 2 Variation of resistivity and concentration of the ITO thin films with pressure of injected oxygen.

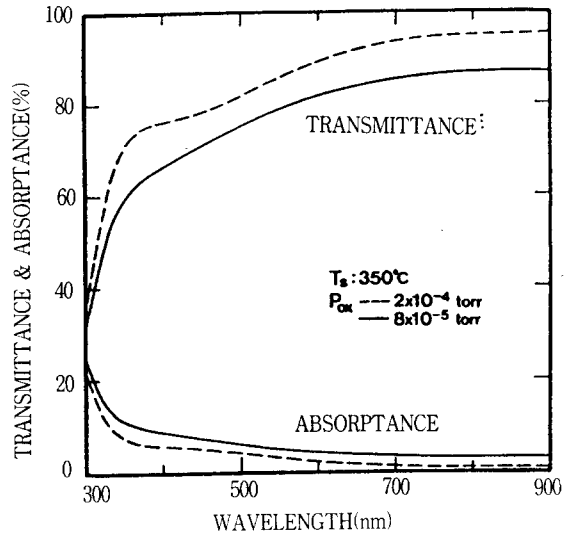
투과도는 기판온도와 주입 산소압의 변화에 따라 크게 변화하였으며 기판온도 350℃, 주입 산소압 2×10^{-4} torr일때 파장 600nm에서 90% 이상으로 가장 우수하였다. 한편 이때의 흡수도는 5% 이하였으며 이러한 결과를 그림 3에 나타내었다.

기판온도에 따른 투과도 변화는 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 $P_{ox} = 2 \times 10^{-4}$ torr, $T_s = 100^\circ\text{C}$ 일때 40% 이하로, 시료의 산화(oxidize)가 불완전하여 비화학양론적이고 금속이 많은 불투명한 ITO막이 형성되었으며, 기판온도가 증가함에 따라 증가하다가, 300℃ 부근에서 포화되는 경향을 나타냈다.

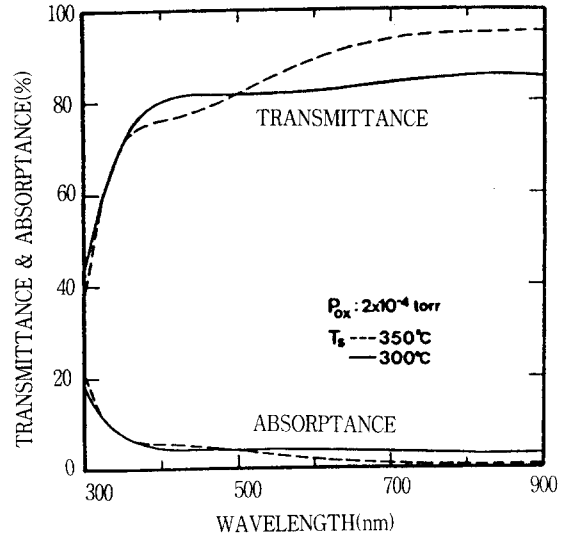
기판온도가 300-350℃이고 산소주입이 없을때 역시 불투명한 박막이 형성되었으며 산소주입이 과잉되었을 때는 과잉된 산소가 ITO 막의 구조적 결함을 일으켜 투과도가 감소하는 결과를 초래했다. 이상과 같이 주입 산소압과 기판온도를 적절히 조절하여 화학양론적이고 우수한 ITO박막을 얻을 수 있었다.

3.2 ITO/p-InP 태양전지의 특성

실온에서 암상태의 전류밀도-전압 특성을 조사하였다. 주입 산소압이 일정할 때 역포화전류밀도 J_c 에 대한 기판온도의 영향은 나타나지 않은 반면, 일정한 기판온도 하에서는 산소압이 증가함에 따라 J_c 는 감소하였고 이에 따라 개방회로전압의 증가를 예상할 수 있었다. 산소가 J_c 에 미치는 영향



(a)



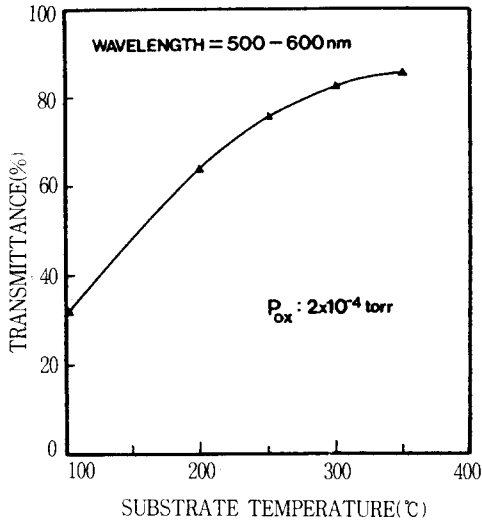
(b)

그림 3 (a) 주입 산소압이 ITO박막의 투과도와 흡수도에 미치는 영향.

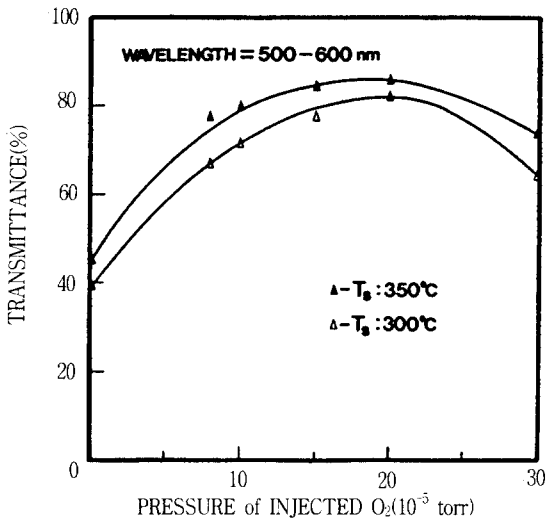
(b) 기판온도가 ITO박막의 투과도와 흡수도에 미치는 영향.

Fig. 3 (a) Effect of the pressure of injected oxygen on transmittance and absorbance of the ITO thin films.

(b) Effect of the substrate temperature on transmittance and absorbance of the ITO thin films.



(a)



(b)

그림 4 (a) ITO박막의 기판온도에 따른 투과도의 변화.

(b) ITO박막의 주입 산소압에 따른 투과도의 변화.

Fig. 4 (a) Variation of transmittance of the ITO thin films with substrate temperature.

(b) Variation of transmittance of the ITO thin films with pressure of injected oxygen.

은 아직까지 규명되지 않은 상태이며 계산으로 구

한 다이오드 상수는 중간 바이어스 영역에서 2에 가까운 값을 가졌다.

그림 5는 기판온도를 달리하여 제작된 ITO/p-InP태양전지의 광조사시 전류밀도-전압특성이며, 그림 6은 산소주입 압력을 변화시켰을때 전류밀도-전압특성 곡선이다. 주입 산소압이 일정한 상태에서는 높은 기판온도에서 제작된 시료가 높은 투과도를 갖기 때문에 보다 큰 단락전류밀도를 나타냈고, 개방회로전압에 있어서는 근소한 차이만을 보였다. 기판온도가 일정한 상태에서는 주입 산소압이 높은 상태에서 제작된 시료가 보다 큰 개방회로 전압을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 주입 산소와 J_c 의 관계에서 예상되었던 개방회로전압의 증가를 확인할 수 있었다.

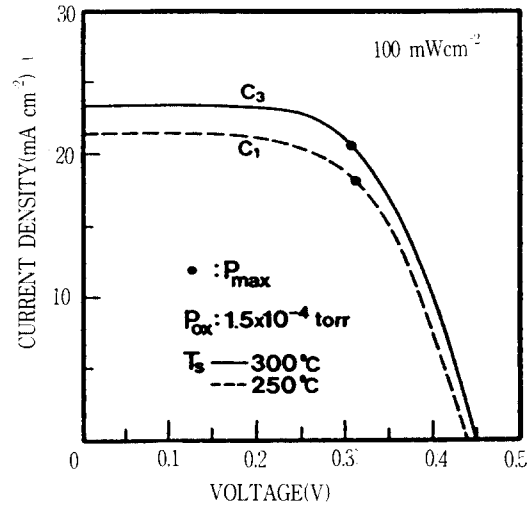


그림 5 기판온도가 ITO/p-InP태양전지의 J-V 특성에 미치는 영향.

Fig. 5 Effect of the substrate temperature on the J-V characteristics of the ITO/p-InP solar cells.

광조사시 다이오드의 전압-전류특성은 이상적인 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.²⁸⁾

$$J = J_c[\exp(qv/nkT) - 1] - J_L \quad (1)$$

여기서 q 는 전자의 전하량, n 은 다이오드 상수, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다. J_c 는 역포화 전류이고, J_L 은 광 생성전류이며 바이어스를 가하지 않았을때 J_L 은 단락회로전류 J_{sc} 와 같으므로 개방회로전압 V_{oc} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.²⁴⁾

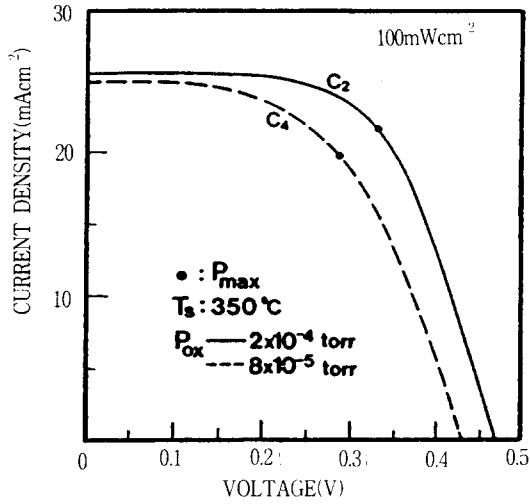


그림 6 주입 산소압이 ITO/p-InP태양전지의 J-V 특성에 미치는 영향.

Fig. 6 Effect of the pressure of injected oxygen on the J-V characteristics of the ITO/p-InP solar cells.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \cdot \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_c} + 1 \right] \quad (2)$$

이 식으로 V_{oc} 는 J_c 에 의존함을 알 수 있다. 식 (1)을 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 로 표현하면,

$$J_{sc} \left[\frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = J_0 \left[\exp \frac{V_{oc}}{nV_T} - \exp \frac{J_{sc}R_s}{nV_T} \right] \quad (3)$$

과 같고, 여기서 $V_T = kT/q$ 이다. 이 식은 다음과 같은 근사를 통해 간략화할 수 있다.

- 1) 대부분의 태양전지에서 $R_s \ll R_{sh}$.
- 2) 매우 약한 광조사시, R_s 는 0.1Ω 정도이고 $J_{sc}R_s$ 는 J_{sc} 가 $3mA$ 보다 작을 때 nV_T 보다 매우 작다. 이 리하여 $\exp(J_{sc}R_s/nV_T)$ 는 1에 근사할 수 있고, 따라서 식 (3)은,

$$J_{sc} - J_0 \left[\exp \frac{V_{oc}}{nV_T} - 1 \right] = \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$

으로 된다. 이론적으로는 J_0 와 n 을 알면 식 (4)로부터 R_{sh} 를 얻을 수 있지만 실제로 얻어진 R_{sh} 는 사용된 J_c 와 n 에 매우 민감하여 정확한 J_c 를 구하기는 힘들다.

- 3) J_c 와 n 은 다음과 같은 근사로 해결된다. 즉, 매우 약한 광 조사시 $J_0[\exp(V_{oc}/nkT)-1]$ 는 무시할 수 있고, 따라서 식 (4)는,

$$J_{sc} = \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

로 쓸 수 있다. 즉, 약한 광 조사시 J_{sc} 와 V_{oc} 사이의 선형적 비례관계를 이용한 직선의 기울기로써 R_{sh} 를 결정할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 그림 7의 기울기로부터 얻은 값은 대체로 $10K\Omega$ 이상이어서 이에 의한 손실은 무시할 수 있었다.

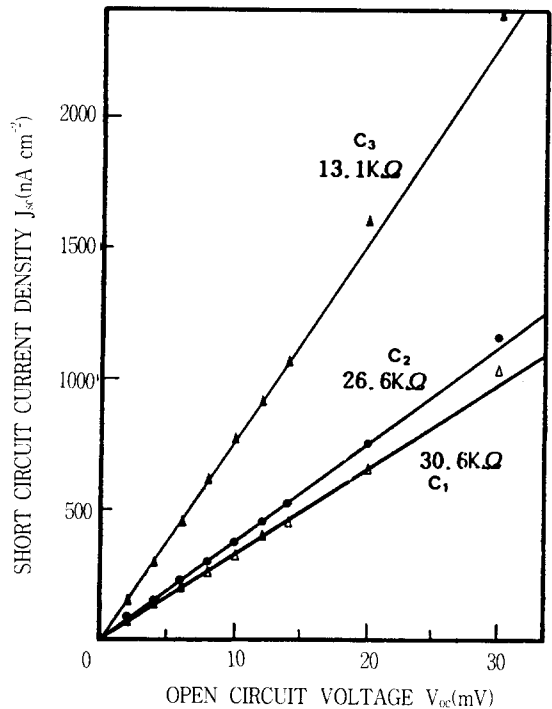


그림 7 병렬저항 측정을 위한 $J_{sc}-V_{oc}$ 특성.

Fig. 7 $J_{sc}-V_{oc}$ characteristics for the measurement of shunt resistance.

광강도 변화법(R_{s1})과 면적법(R_{s2})의 두가지 방법으로 측정된 직렬저항은 1Ω 정도의 차이를 보였으며, 약 2.5Ω 이상에서 태양전지의 효율에 영향을 미치는 값으로 나타났다. 이는 시료의 표면처리, 오염 접촉저항 등과 대체로 높게 나타난 J_c 에 의한 손실에 기인한 것으로 사료된다. 한편 그리드 라인을 형성하여 비교적 높은 효율을 보인 태양전지(C_{2F} , C_{3F})의 효율곡선을 그림 8에 나타냈으며 이상과 같은 결과를 표 1에 요약하였다.

5. 결 론

표 1 ITO/p-InP 태양전지의 광기전력 특성

Table 1 Photovoltaic characteristics of the ITO/p-InP solar cells.

	C1	C2	C2 Finger	C3	C3 Finger	C4
Substrate Temperature(°C)	250	350		300		350
Oxygen Partial Pressure (torr)	1.5×10^{-4}	2×10^{-4}		1.5×10^{-4}		8×10^{-5}
V_{oc} (V)	0.44	0.47		0.45		0.43
J_{sc} (mAcm ⁻²)	21.43	25.5	29.48	23.33	26.2	25
Fill Factor(%)	59.84	60.03	61.35	60.16	61.15	53.02
Solar Efficiency(%)	5.64	7.19	8.5	6.32	7.21	5.70

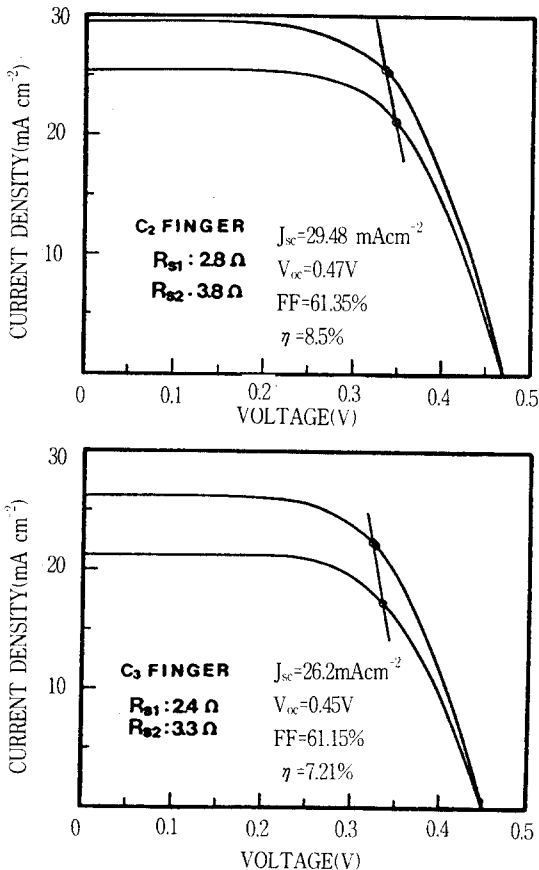


그림 8 그리드 라인을 사용한 태양전지의 J-V 특성과 직렬저항의 측정.

Fig. 8 Measurements of the J-V characteristics and the series resistance of the solar cells using the grid lines.

본 논문에서는 전자빔 증착기를 사용하여 ITO 박막과 ITO/p-InP 태양전지를 제작하였고, 박막의

비저항, 농도, 투과도 및 태양전지의 전류밀도-전압 특성, 기생저항 등을 조사하였다.

ITO의 최적 증착 조건은, 기판온도 350°C, 주입 산소압 2×10^{-4} torr로 나타났으며 이때의 투과도, 비저항과 농도는 각각 80%이상, $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$, $6.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 이었다. 주입 산소압이 증가하면 역포화 전류는 감소하였고 이에 따라 개방회로전압은 증가하였다. 광강도변화법과 면적법으로 측정된 직렬저항은 약 1Ω의 오차를 보였으며, 2.5Ω 이상으로 태양전지의 효율에 영향을 주었다. 최적 조건에서 제작된 태양전지는 단락회로전류밀도 $J_{sc}=29.48 \text{ mAcm}^{-2}$, 개방 회로전압 $V_{oc}=0.47\text{V}$, 충전율 $\text{FF}=61.35\%$, 효율 $\eta=8.5\%$, 직렬저항 R_s 는 약 26.6kΩ이었다. 이와같은 결과로부터 산소와 다른 불활성 기체의 혼합등을 통하여 보다 양질의 ITO박막을 제작하여 낮은 개방회로 전압과 높은 직렬저항에 의한 손실을 보완하면 더 높은 효율의 태양전지를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. R.P. Howson, C.A. Bishop and M.I. Ridge, "Preparation of Transparent Conducting Thin Films," Thin Solid Films 90, 296(1982).
2. M. Mizubashi, "Lamellar and Grain Boundary Models for the Electrical Properties of Post-Oxidized ITO Films," Jpn. J. Appl. Phys. 22, 615(1983).
3. I. Hambeng, A. Hjortsberg and C.G. Granqvist, "High quality transparent heat reflection of reactively evaporated indium tin oxide," Appl. Phys. Lett. 40, 362(1982).
4. I. Hamberg and C.G. Granqvist, "Evaporated Sn-doped In₂O₃ films : Basic optical propert-

- ies and applications to energy-efficient wind-
ows," J. Appl. Phys. 60, R123 (1986).
5. H. Aharoni, T.J. Coutts, T. Gessert, R. Dhere, and L. Schilling, "Ion-beam sputtered indium tin oxide for InP solar cells," J. Vac. Sci. Technol. A4, 426(1986).
 6. T.J. Coutts, N.M. Pearsall, and L. Tarricone, "The influence of input power on the performance of rf sputtered ITO/InP solar cells," J. Vac. Sci. Technol. B2, 140(1984).
 7. S. Ishibashi, Y. Higuchi, Y. Ota and K. Nakamura, "Low resistivity indium tin oxide transparent conductive films. II. Effect of sputtering voltage on electrical property of films," J. Vac. Sci. Technol. 8A, 1430(1990).
 8. S.J. Jiang and C.G. Granqvist, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 562, 129(1985).
 9. R.B. Goldner, "Temperature dependence of the 10.6- μ m reflectivity of ITO-coated silicon," Appl. Opt. 16, 808(1977).
 10. A.K. Saxena, S.P. Singh, R. Thangaraj and O.P. Agnihotri, "Thickness Dependence of the Electrical and Structural Properties of In_2O_3 :Sn Films," Thin Solid Films 117, 95(1984).
 11. T.S. Moss, "Handbook on Semiconductors," North Holland Pub., 4, 716(1981).
 12. A. Yamamoto, M. Yamaguchi and C. Uemura, "High conversion efficiency and higher radiation resistance InP homojunction solar cells," Appl. Phys. Lett. 44, 611(1984).
 13. M. Yamaguchi, A. Yamamoto, Y. Itoh and C. Uemura, Proc. of the 2nd Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf. Beijing, PRC(Adfied Advertising Co., Hong Kong), 573(1986).
 14. I. Weinberg, C.K. Swartz, R.E. Hart Jr. and T.J. Coutts, Proc. 20th IEEE Photovoltaics Specialists Conf., Las Vegas, NV, (IEEE, New York, NY) 893(1988).
 15. K.S. Sree Harsha, K.J. Bachmann, P.H. Schmidt, E.G. Spencer and F.A. Thiel, "n-indium tin oxide/p-indium phosphide solar cells," Appl. Phys. Lett. 30, 645(1977).
 16. T.J. Coutts and S. Naseem, "High efficiency indium tin oxide/indium phosphide solar cells" Appl. Phys. Lett. 46, 164(1985).
 17. X. Li, M.W. Wanlass, T.A. Gessert, K.A. Emeny and T.J. Coutts, "High-efficiency solar cells fabricated from direct-current magnetron sputtered n-indium tin oxide onto p-InP grown by atmospheric pressure metalorganic vapor phase epitaxy," J. Vac. Sci. Technol. A7, 827(1989).
 18. R. Singh and J. Shewchun, "A possible explanation for the photovoltaic effect in indium tin oxide on InP solar cells," J. Appl. Phys. 49, 4588(1978).
 19. J. Shewchun, J. Dubow, A. Myszkowski and R. Singh, "The operation of the semiconductor-insulator-semiconductor(SIS) solar cell," J. Appl. Phys. 49, 855(1978).
 20. T.J. Coutts, N.M. Pearsall, R. Nottenburg, P.J. Ireland, and L.L. Kazmerski, Proc. of 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Kissimmee, Florida, 1077(1981).
 21. M.J. Tsai, A.L. Fahrenbruch and R.L. Bube, "Sputtered oxide/indium phosphide junctions and indium phosphide surfaces," J. Appl. Phys. 51, 2696(1980).
 22. T.A. Gessert, X.Li, M.W. Wanlass and T.J. Coutts, "Buried Homojunction Solar Cells Formed in p-InP During Sputter Deposition and Hydrogen Plasma Processing," IEEE Trans. Electron Devices ED37, 153(1990)
 23. L.J. Van der Pauw, "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape," Philips Res. Rep. 13, 1 (1958).
 24. G.L. Araujo and E. Sanchez, "A New Method For Experimental Determination of the Series Resistance of a Solar Cell," IEEE Trans. Electron Devices ED29, 1511(1982).
 25. M. Wolf and H. Ranchenbach, "Series resistance effects on solar cell measurements," adv. Energy Conv. 3, 455(1963).
 26. P. Nath, R.F. Bunshah, B.M. Basol and O.M. Staffsud, "Electrical and optical Properties of In_2O_3 :Sn Films Prepared by Activated Reactive Evaporation," Thin Solid Films. 72, 463(1980)
 27. S.W. Jan and S.C. Lee, "Preparation and Characterization of Indium Tin Oxide Deposited by Direct Thermal Evaporation of Metal Indium and Tin," J. Electrochem. Soc 134(8),

2056(19876).
28. S.H. Chan and C.H. Phang, "A Method for the direct Measurement of Solar Cell Shunt

Resistance," IEEE Trans. Electron. Devices ED31, 381(1984).

지자소개

맹경호



1967년 11월 1일생. 1990년 광운대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1994년 현재 (주) 포스코 홀스 연구원.

송복식



.967년 12월 1일생. 1990년 광운대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자재료공학과 박사과정.

김선대



1956년 9월 11일생. 1981년 광운대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박사). 1994년 현재 대전산업대학 재료공학과 조교수.

문동찬



1935년 2월 25일생. 1957년 연세대 이공대 물리학과 졸업. 1965년 연세대 대학원 물리학과 졸업(석사). 1981년 연세대 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 1982년 미국 라이드-패더슨 공군연구소 초빙과학자. 1994년 현재 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수.