

CdTe 와 CdS-CdTe 이종접합 제작과 그 광전특성

Preparation and Photovoltaic Properties of the CdTe and CdS-CdTe heterojunction

김성구* 박계춘* 이진**

* 전남대학교 전자공학과

** 목포대학교 전기공학과

Seong-ku Kim*, Gye-Choon Park*, Jean-Lee**

* Dept. of Electronics Eng., Chonnam Nat. Univ.

** Dept. of Electrical Eng., Mokpo Nav. Univ.

<Abstract>

Devices of ITO/CdS/CdTe/Te/Al were prepared by Electron-Beam deposition under a vacuum of 7×10^{-6} [torr]. Optical, Electrical, Structural and Photovoltaic properties of thin film CdS/CdTe at substrate temperature 300~500[°C] were also investigated. The structure of CdTe films deposited was of the zincblende type a preferential orientation of the (111) plane parallel to the substrate, the CdTe dark resistivity was about 10^6 [Ω cm]. The conversion efficiency of the cell increased with increasing substrate temperature. The best-fabricated Cell was a conversion efficiency of 9.1[%].

1. 서론

이종접합을 이루는 반도체가 광기전력소자로 이용될 할 경우 요구되는 조건은, 2개 반도체의 격자정수와 팽창계수의 정합이 좋아야 하며, 광흡수층 물질은 에너지 금지대폭(E_g)이 1.4[eV] 정도로 작고, 광투과층 물질은 가능한 넓은 금지대폭을 갖는 반도체이어야 한다.¹⁾ 이와같은 조건을 만족하는 II-VI족 화합물 반도체 이종접합은 CdS/CdTe계가 가장 기대되고 있는 접합인데,²⁾ CdTe는 에너지 금지대폭이 상온에서 1.5[eV] 정도로서 태양광을 효과적으로 사용할 수 있는 최적 이론치³⁾에 해당하는 금지대폭을 가지고 있고, 광흡수계수가 크며 직접천이대를 가지므로 태양광 변환소자로 적합하다.⁴⁾ 한편 CdS는 에너지 금지대폭이 2.43[eV]이며, 막의 비저항이 낮아 대부분의 태양광을 투과시키기 때문에 CdS/CdTe 및 CdS/Cu₂S 광기전력소자의 광투과층 물질로서 널리 이용되어 왔다. 또한 반사방지층 ITO(indium tin oxide)와 결합된 CdS 등을 광투과층으로 하는 이종접합형에 관한 연구도 많이 진행되고 있다.⁸⁾ 다결정 박막형 CdS/CdTe 이종접합 제작방법에는 Screen-printing,⁹⁾ Electro-deposition,¹⁰⁾ Closed-spaced-sublimation,¹¹⁾ Chemical-vapor deposition¹²⁾ 그리고 진공증착법¹³⁾이 있으며, 그 중에도 진공증착법은 저가격이면서 태면적의 지상용 태양전지를 제작할 수 있는 장점이 있어 널리 사용되고 있다.

진공증착법으로 증착된 직렬구조(tandem cell)의 투명전도 접촉을 갖는 CdS/CdTe 태양전지는 최근에 Birkmire 등¹⁴⁾에 의해서 보고되고 있으나, 진공 중에서 E-beam 증착으로 제작된 CdTe 필름특성과 CdS-CdTe 박막의 광전압 특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 게다가 보고된 논문은 기판온도가 300[°C]보다 낮은 온도에서 증착된 것이었다.

본 논문에서는 300[°C] 보다 더 높은 기판온도에서 CdTe 박막 제작 가능성을 연구하였으며, 태양전지에 응용될 수 있는 CdTe 박막의 구조적, 전기적, 광학적 특성과 광전압특성을 통하여 최적제작조건을 조사하였다.

2. 실험 및 측정

2-1. 시편 제작

본 실험에서는 E-beam 증착법을 사용하여 ITO/CdS/CdTe/Te/Al 소자를 형성하였다. 증착은 세척한 기판을 설치한 후 진공(2×10^{-6} [torr])시킨 상태에서 증착을 하였다. 소자를 제작하기 위해서 ITO(indium tin oxide)가 코팅된 유리 글라스($10 \times 10 \text{cm}^2$)를 기판으로 사용하였다. ITO 박막의 면저항은 $50[\Omega/\text{sq.}]$ 이고, 투과율은 90[%] 이상이었다. 이들 기판을 $2 \times 2[\text{cm}]$ 로 절단해서 먼저 기판 세척을 하였다. 제작에 사용한 CdS 분말은 Aldrich Chem. Inc의 제품으로, 순도가 99.995[%] 이었으며, CdS 박막과 저항성접촉을 형성하는데 사용한 Indium 결정도 같은 회사제품으로 순도는 99.99[%]이고 은색을 띠었다. CdTe 박막을 제작에 사용된 CdTe 분말은 Aldrich Chem. Co. 제품으로 순도 99.999[%]의 분말이다. 시편제작에 사용된 장치는 Korea Vacuum Co.의 K.V.E-660 evaporator이며, 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 증착시 분말의 spattering을 방지하기 위해서, CdS와 CdTe 분말을 pellet, 약 0.5[g]단위로 제조하여 300[°C]에서 20분간 미리 소결한 다음 흑연도가니안에 놓았다. CdS 증착시 Cadmium와 Sulfur 비율로 저항값을 조절하려면 기판온도와 증착속도를 변화시켜 얻을 수 있으며, 300[°C] 이상의 기판온도에서 형성된 박막은 Cadmium 원자가 Sulfur 원자에 비해 적어서 높은 저항값을 갖게 되는 반면에 기판온도 150[°C] 이하에서 형성된 박막은 Cadmium 원자의 과잉으로 낮은 저항값을 얻을 수 있다. 또 증착속도를 감소하면서 증착하면 Cadmium 원자가 막에 부착되는 확률이 떨어져서 증착된 박막은 높은 저항값을 갖게 된다. 반대로 증착속도를 증가시키면 Cadmium 원자의 부착력이 증가되어 낮은 저항값을 갖는 박막을 얻을 수 있다. 따라서, 제작된 소자는 투명전극 ITO glass위에 먼저 CdS 박막을 기판온도 120[°C]를 유지하면서 $0.4[\mu\text{m}]$ 두께로 증착비는 $20 \sim 40[\text{A/s}]$ 로 조절하고, 약 22분간 E-gun(model HA4379)로 증착하여 높은 전도성($10^{-3}[\Omega\text{cm}]$)을 갖는 n-형 CdS층을 얻었다. 기판에 증착되는 물질의 두께는 증착률은 XTC sensor (INFICON)로 측정하였다.

CdTe 박막위에 오염성 접촉 전극형성을 위해 Al을 ITO glass와 CdTe/Te 층위에 증착시켰다. Al wire는 텅스텐 필라멘트에 매달아 증착하였다. 그리고 Cu 도선을 도전성 Ag 페스트를 사용해서 Al 전극에 부착시켰다. 광전특성을 측정하기 위해서 negative 전극과 positive 전극이 필요하게 되는데, negative 전극은 인듐을 진공증착하여 형성하였고, positive 전극은 CdTe 필름위에 Te-Al을 증착한 후 Ag-paint를 입혀 전극으로 사용하였다. Fig.2는 시편제작을 위한 전체공정도를 나타내었고, Fig.3에 본 실험에서 제작한 시료의 단면도를 나타내었다.

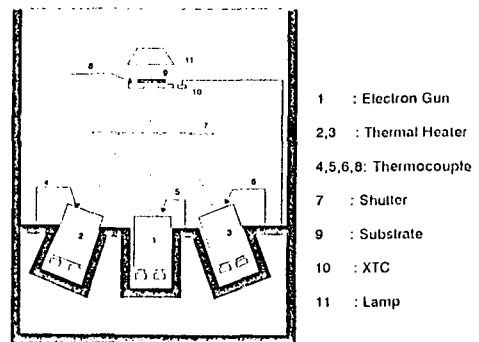


Fig.1 Schematic Diagram of Evaporation System

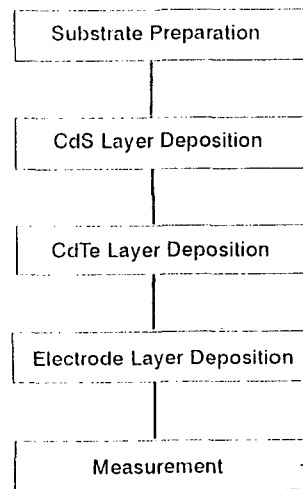


Fig.2. Flow chart of Cell Preparation

2-2. 측정

(1) 광학적 특성 측정.

제작된 시편의 광학적특성으로 광흡수도 및 광투과도를 측정하였다. 측정은 Mattson사의 Polaris FT-IR spectrometer 및 Varian사의 uv-visible spectrophotometer를 사용하였다. FT-IR spectrometer의 여기광원은 He-Ne 레이저의 IR-beam이다.

(2) 전기적 특성 측정

제작된 소자의 전기비저항을 측정하기 위해서 4-point probe법을 이용하였다.

(3) X-선 회절 분석

증착된 필름의 열처리와 증착시 기판온도에 따른 결정구조 분석과 재결정의 정도를 알기 위해서 제작된 소자를 X-선 회절분석하였다. X-선 회절 무늬기록을 위해 사용한 분석기는 Rigaku Geiger flex D/max-1A였으며, 이때 사용된 X-선 회절기의 음극은 Cu ka, 파장 1.542[Å]이었다. 관내전압은 35[kV], 관내전류는 15[mA], full scale은 1000[cps], time constant는 1[sec], scanning speed는 4[°/min], chart speed는 4[cm/min], 회절각 2θ는 20°에서 70°까지 주행시키면서 회절무늬를 기록하였다.

(4) 광전 특성 측정

태양전지의 전류-전압 특성을 측정하기 위해서, 태양광하 또는 50[mW/cm²]의 텅스텐 광하에서 측정하였다. 이때 사용된 기록계는 X-Y Recorder(Philips, PM 8155)이다. 빛의 파장에 따른 시편들의 단락전류 변환능력을 측정하기 위하여, 광원으로 텅스텐 램프를 사용하고 Mochromator(Thermo Jarrell Ash Co. model 82497)의 출력광을 시편에 비추어 picoammeter(Keithley 480)로 단락전류를 측정하였다. 각 파장에 대한 단락전류를 입사광의 밀도로 나누어 각파장의 일정한 입사강도조건하에서 분광반응도를 계산하였다.

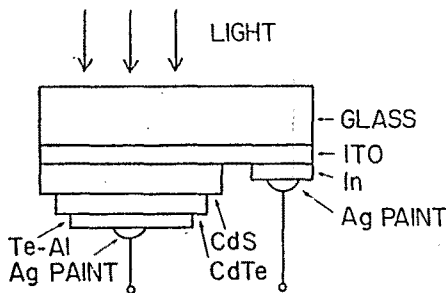


Fig.3. Structure of Cell

2. 결과 및 고찰

(1) 박막 제작

CdS 박막은 기판온도 120[°C]를 유지하면서 0.4[μm] 두께로, 증착비는 20~40[Å/s]로 조절하고 Electron-beam으로 증착하여 높은 전도성을 갖는 n-형 CdS층을 얻었다. CdTe는 기판온도를 300~500[°C]까지 변화시키면서 CdTe 박막을 제작하고, 증착시 증발원과 두께와의 관계를 Fig.4에 나타내었다. 박막의 색깔은 갈색에서 증착시간을 길게할수록, target와 거리가 가까울수록, 기판온도가 증가할수록 검은갈색으로 변화하였다. 이와 같은결과로부터 CdTe 박막 두께는 근사적으로 증발원과 기판사이거리에 역비례함을 알 수 있으며, 증발원과 기판사이 거리가 짧으면 증발원으로부터 분출된 source 입자가 기판에 달라붙음으로 적정 기판-증발원 거리를 20[cm]로 유지하였다. CdTe 박막 두께는 기판온도가 증가함에 따라 감소하는데, 그 원인은 고온에서 증착시 re-evaporated된 CdTe량 증가가 직접적인 이유인 것으로 생각된다.

(2) 광학적 투과도 특성

기판온도 450[°C]에서 CdTe 박막을 0.5[μm]-2.5[μm]의 두께로 변화시키고 파장을 400[nm]-1000[nm]범위로 입사시켰을때 박막의 투과도특성을 Fig.5에 나타내었다. 광투과도의 시발점은 600[nm]-820[nm] 내에서 발생하였고, 박막 두께가 증가할수록 시발점은 장파장 쪽으로 이동하였다. 제작된 CdTe 박막의 최초 피이크 점은 파장 820[nm] 근방에서 날카로운 광학적 투과도를 나타내었으며, 이 점은 2.0[μm] 이상 필름두께를 증가시켜도 단파장 및 장파장쪽으로 이동되지 않았다. 이 결과로 파장 820[nm]는 CdTe 대역간극 천이에너지 (1.5[eV])에 상응하며, CdTe의 에너지 대역간극보다 더 큰 태양방사에너지는 증착된 CdTe층의 약 2[μm] 두께 안에서 완전히 흡수되었다. (5.16)

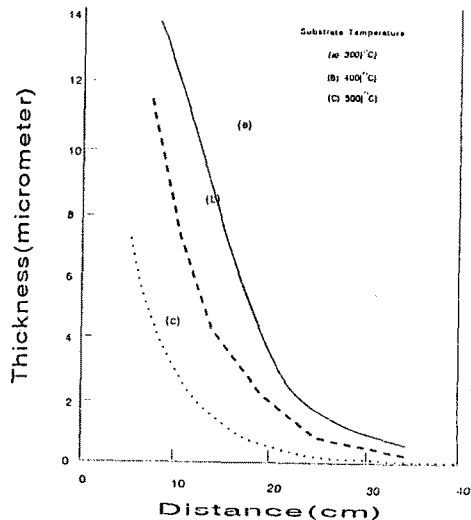


Fig.4. CdTe Thickness and Source-to Substrate Distance

(3) 전기적 특성

CdTe 박막을 기판온도 300[°C]~500[°C]로 변화시키면서 증착하고, 증착시 기판온도와 비저항관계를 Fig.6에 나타내었다. 이때 증착비는 60[A/s]였고, 약 30분간 증착하였으며 광원은 텅스텐 램프를 사용하였다. 기판온도를 증가시킴에 따라서 비저항이 증가하였고, 박막 비저항은 $10^5 \sim 10^6 [\Omega \text{cm}]$ 로 나타났다. 지금까지 보고된 CdTe 박막은 암상태에서 $10^7 [\Omega \text{cm}]$ 이상의 저항률을 갖는 고저항이었다.¹⁷⁾ 300~500[°C] 범위의 기판온도에서 증착된 CdTe 박막은 $10^6 \sim 10^7 [\Omega \text{cm}]$ 정도의 암저항(dark resistivity)을 가졌다. 이런 박막의 대부분은 광도전성(photoconductivity)¹⁸⁾을 나타낸다.

(4) 구조적특성

CdTe 박막 결정구조를 알아보기 위해서 X-선 회절분석을 하여 그결과를 Fig.7.에 나타내었다. 증착기판온도는 450[°C]였다. CdTe는 성장조건에 따라 zincblende 구조나 wurtzite 구조를 갖는다. 그러나 유리위에 증착으로 CdTe 필름을 성장시킬 경우에는 zincblende 구조를 가지면서 (111)면이 우세하게 성장되는 것으로 보고되고 있다.¹⁸⁻¹⁹⁾ (a)는 source로서 사용한 CdTe 분말의 회절무늬이며 (b)는 450[°C] 기판온도일때 시편의 X-선 회절무늬이다. 23.6°인 곳에서 (111)면이 강하게 나타남으로 인해 성장된 CdTe 필름은 zincblende 구조를 가지고 있음을 알 수 있었으며 격자상수 a는 6.481[Å] 이었다.

(5) 광전특성

기판온도 120[°C], 두께 0.5[μm]인 CdS 박막을 ITO glass위에 증착시키고, 추가로 2[μm]두께의 CdTe를 기판온도에 따라 증착하여 CdS-CdTe 이종접합을 제작하고, 이 소자에 파장 400[nm]~1000[nm]를 입사시키고 그에따른 분광전류특성을 조사하여 Fig.8에 나타내었다. 단락전류-분광특성측정 결과, 완성된 소자는 형(type)-전이가 발생하였음을 알 수 있었다.²⁰⁾ 즉 소자는 파장 520~810[nm] 범위에서 가장 Photosensitive하며 곡선양끝 경계값에 상응하는 에너지는 CdS 및 CdTe 에너지 간극인 2.4[eV] 와 1.5[eV]이고 CdTe 두께 2[μm]내에서 CdS로부터 투과된 광은 모두 흡수되었음을 알 수 있었다.

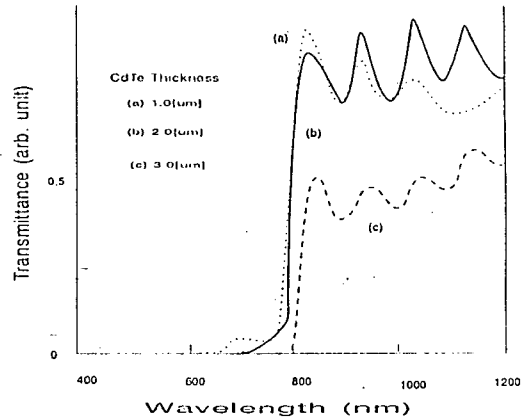


Fig.5. Transmittance of CdTe films

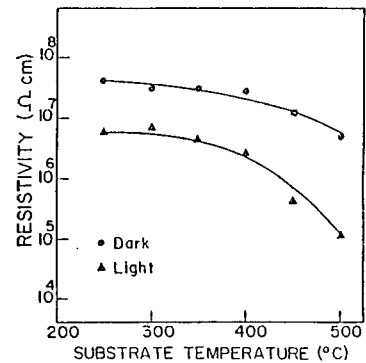


Fig.6. Dark and Light Resistivity of CdTe films

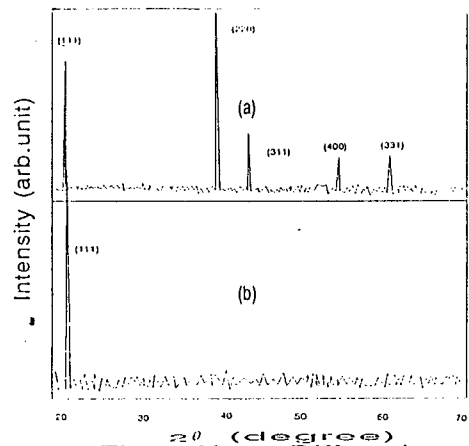


Fig.7. X-ray Diffraction

기판온도를 달리하면서 제작된 이종접합 광기전력특성을 Fig. 9에 나타내었다. 완성된 소자를 증착시 기판온도를 상승시키면 개방회로전압(open circuit voltage : V_{oc})은 증가를 하였고, 접합의 변환효율(η)도 기판온도에 따라 상승하였다. 높은 기판온도에서 효율이 감소하는 이유는 증착시 고온으로 인한 re-evaporation되는 양의 증가와 그로인한 박막의 불균일성과 기판온도가 450[°C]를 정점으로 고온일수록 직렬저항이 증가하기 때문으로 생각된다. 높은 변환효율을 얻는데 있어서 방해가 되는 요소는 직렬저항(R_s)의 고저항에 기인하는 낮은 값의 충실도(fill factor)와 낮은 개방회로전압이다. V_{oc} 의 일반적인 관계식은 $V_{oc} = (nkt/q) \ln[(J_L/J_0)]$ 이다. 여기서 n은 이상계수, k는 볼츠만상수 그리고 J_L 은 광여기전류이다. 본 연구에서 제작한 시편은 높은 개방전압을 보인 반면 단락회로전류는 낮은 값을 보였다. 개방회로전압의 증가는 포화전류밀도(saturation current density : J_0)의 감소에 발생함을 알 수 있다. 직렬저항과 포화전류밀도의 감소는 고효율 태양전지를 얻는데 필수적이다. 개방전압의 증가로 보아 두 인자중 포화전류밀도는 기판온도가 증가함에 따라 상당히 감소되었다. 그리고 태양전지 광전특성은 기판온도가 증가함에 따라 현저히 개선되었음을 알 수 있었고, 가장 좋은소자 제작을 위한 CdTe 박막조건은 기판온도 450[°C]에 증착된 것으로 변환효율 9.1[%]를 나타내었다.

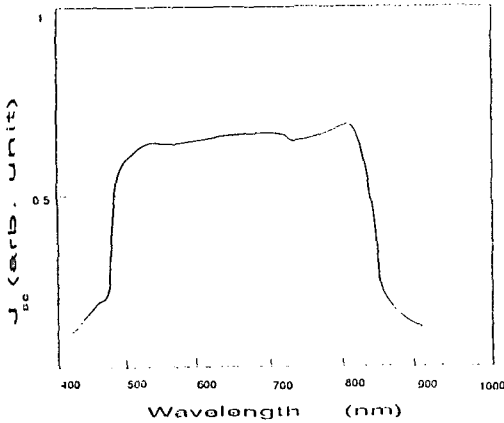


Fig. 8. Spectral Dependence of Short-Circuit Current

3. 결론

ITO glass위에 기판온도 200[°C], 증착율 20~40[Å/s], 두께 0.4[μm]로 22분간 CdS박막을 E-빔 증착하고, 추가로 CdTe박막을 기판온도 450[°C], 증착율 60[Å/s], 두께 2[μm]로 30분간 증착하여 이종접합 ITO/CdS/CdTe/Te/Al 소자를 제작한 다음 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 증착된 CdTe 박막구조는 기판에 평행한 (111)면을 갖는 zincblende 구조였다.
- (2) 증착된 CdTe 박막의 광투과도, 기초-피이크가 발생한 점은 820[nm]였고, 따라서 CdTe박막의 에너지 대역간극은 1.5[eV]이었다.
- (3) 제작된 CdTe 박막 Light resistivity는 $10^5 \sim 10^6$ [Ωcm]로 나타났다. 300~500[°C] 범위의 기판온도에서 증착된 CdTe 박막은 Dark Resistivity $10^5 \sim 10^7$ [Ωcm] 정도의 암저항(dark resistivity)을 가졌다.
- (4) 증착시 기판온도를 상승시키면 개방회로전압(open circuit voltage : V_{oc})은 증가를 하였고, 접합의 변환효율(η)도 기판온도에 따라 상승하였다. 그러나 높은 기판온도에서 효율이 감소하는 이유는 증착시 고온으로 인한 re-evaporation되는 양의 증가와 그로인한 박막의 불균일성과 기판온도가 450[°C]를 정점으로 고온일수록 직렬저항이 증가하기 때문으로 생각된다.
- (5) 가장 양호한 소자는 CdTe 기판온도 450[°C]일때 증착된 것으로 전류밀도 11.2[mA/cm^2], 개방전압 0.49[V], 충실도 0.40, 변환효율 9.1[%]를 나타내었다.

이상의 결과로부터 300[°C]이상에서 증착된 CdTe 박막도 이종접합 nCdS-pCdTe 태양전지에 실용가능함을 알 수 있었다.

Fig. 9. Photovoltaic Property of CdS-CdTe Heterojunction

기판온도 [°C]	전류밀도 J_{sc} [mA/cm^2]	개방전압 V_{oc} [V]	충실도 FF	변환효율 η (%)
(1) 300 [°C]	6.2	0.36	0.22	2.0
(2) 350 [°C]	7.3	0.39	0.30	3.6
(3) 400 [°C]	9.4	0.41	0.37	5.9
(4) 450 [°C]	11.2	0.49	0.40	9.1
(5) 500 [°C]	8.0	0.30	0.21	2.1

참 고 문 헌

1. Charles E. Backus, "Solar Cells", IEEE Press, pp. 38-39, 1976.
2. 박창화, "에너지변환공학", 김영사, 1990.
3. Nobuo Nakayama, Hitoshi Matsumoto, Akihiko Nakano, Seiji Ikegami, Hiroshi Uda and Toshio Yamashita, "Screen Printed Thin Film CdS/CdTe Solar Cell", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 4, pp. 703-712, 1990.
4. 노재성, "Cd 및 Te 혼합분말을 사용하여 제작한 CdTe 박막 및 CdS/CdTe 태양전지 특성", 한국과학기술원, 1988. 2. 송인덕, "Study on the Compound Semiconductor n-CdS/p-Silicon Thin Film Solar Cell", 인하대학교, 1991.
5. Hiroshi Uda, Hiromitsu Taniguchi, Manabu Yoshida and Toshio Yamashita, "Polycrystalline Thin Film CdS/CdTe Solar Cells", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 17, No. 3, pp. 585-586, 1978. 3. Kenneth Zanio, "Semiconductors Semimetals", Academic Press Inc., 1978.
6. Bulent M. Basol, "High-efficiency Electroplated Heterojunction Solar Cell", J. Appl. Phys. Vol. 55, No. 2, 15, pp. 601-603, 1984. 4. Stephen J. Fonash, "Solar Cell Device Physics", Academic Press Inc., 1981.
7. Julio A. Aranovich, Dolores Golmayo, Alan L. Fahrenbruch, and Richard H. Bube, "Photovoltaic Properties of ZnO/CdTe Heterojunctions Prepared by Pyrolysis", J. Appl. Phys. Vol. 51, No. 8, pp. 4260-4266.
8. Hirochi Matsumoto, Akihiko Nakano, Hiroshi Uda, Seiji Ikegami, and Toshihiko Miyazawa, "CdS Sintered Film for CdS/CdTe Solar Cell", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 21, No. 5, pp. 800-801, 1982. 8, 1980. 5. Martin A. Green, "Solar Cells", Prentice-Hall Inc., 1982.
9. Hiroshi Matsumoto, Kiyoshi Kuribayashi, Yasumasa Komatsu, Akihiko Nakano, Hiroshi Uda, and Seiji Ikegami, "30x30cm² CdS/CdTe Single Substrate Module Prepared by Screen Printing Method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 22, No. 5, pp. 891, 1983. 6.
10. Kim Mitchell, Alan Fahrenbruch, and Richard H. Bube, "PhotoVoltaic Determination of Optical-Absorption Coefficient in CdTe", J. Appl. Phys. Vol. 48, No. 2, pp. 829-830, 1977.
11. J. G. Werthen, A. L. Fahrenbruch, and R. H. Bube, "Surface Preparation Effects on Efficient Indium-Tin-oxide-CdTe and CdS-CdTe Heterojunction Solar Cells", J. Appl. Phys. Vol. 54, No. 5, pp. 2750-2756, 1983.
12. Kim W. Mitchell, Alan L. Fahrenbruch and Richard H. Bube, "Evaluation of the CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell", J. Appl. Phys. Vol. 48, No. 10, pp. 4365-4371, 1977.
13. Hiroshi Uda, Seiji Ikegami and Hajimu Sonomura, "Effect of Substrate Temperature on the Photo voltaic Properties of a CdS/CdTe Solar Cell", J. Appl. Phys. Vol. 29, No. 10, pp. 2003-2007, 1991. 1
14. T. H. Myers, A. W. Waltuer, and J. F. Schetzina, "Properties of CdTe-Te Alloy Films Prepared using Molecular Beams", Vol. 53, No. 8, pp. 5697-5702, 1982. 9. Thomas C. Anthony, Alan L. Fahrenbruch, Michael G. Peters, and Richard H. Bube, "Electrical Properties of CdTe Films and Junctions", J. Appl. Phys. Vol. 57, No. 2, pp. 400-410, 1985.
15. 김선재, "소결체 CdS/CdTe 太陽電池의 分光反應度", 한국과학기술원, 1987
16. S. S. Ou and M. Stafsud B. M. Basol, "Optical Properties of Electrochemically Deposited CdTe films", J. Appl. Phys. Vol. 55, No. 10, pp. 3769-3772, 1984.
17. T. L. Chu, Shirley S. Chu, Ferekides, J. Britt, and C. Q. Wu, "Cadmium Telluride Films by Metallogic Chemical Vapor Deposition", J. Appl. Phys. 69(11), 1, pp. 7651-7655, 1991.
18. S. R. Das and T. G. Cook, "Temperature and Illumination Intensity Dependence of Photoconductivity in Sputter-deposited Heteroepitaxial (100) CdTe Layers", J. Appl. Phys. Vol. 69, No. 12, pp. 8210-8216, 1991.
19. T. L. Chu, Shirley S. Chu, Y. Paulean, K. Murthy, and E. D. Stokes, "Cadmium Telluride Films on Foreign Substrates", J. Appl. Phys. Vol. 54, No. 1, pp. 398-403, 1983.
20. T. L. Chu, Shirley S. Chu, F. First, H. A. Maseem, and R. Stawski, "Deposition and Characterization of p-type Cadmium Telluride Film", J. Appl. Phys. Vol. 58, No. 3, 1985.
21. Yoshiji Kawai, Yosinori Ema and Toshiya Hayashi, "Effect of Deposition Rate and Substrate Temperature on Properties of CdTe Film", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 22, No. 5, pp. 803-807, 1983.
22. Hitoshi Matsumoto, Akihiko Nakano, Yasumasa Komatsu, Hiroshi Uda, Kiyoshi Kuribayashi and Seiji Ikegami, "8.5% Efficient Screen-printed CdS/CdTe Solar Cell Produced on a 5x10cm² Glass Substrate", Jpn. J. App. Phys. Vol. 22, No. 2, pp. 269-271, 1983.
23. Shohei Fujiwara, Yuki Yaegashi, Tsukasa Sawaki, "Evaporated CdS Films and Their Backing", Nat. Technical. Report. Vol. 11, No. 6, pp. 385-397
24. Kiyoshi Kuribayashi, Hitoshi Matsumoto, Hiroshi Uda, "Preparation of Low Resistance in Screen Printed CdS/CdTe Solar Cell", J. Appl. Phys. Vol. 22, No. 12, pp. 1828-1831, 1983