

CdS 박막의 제조 방법에 따른 물성 및 CdS/CdTe 이종접합의 전기적 특성 분석

Characterization of CdS Thin Films and CdS/CdTe Heterojunction Prepared by Different Techniques

이재형^{1,a}
(Jae-Hyeong Lee^{1,a})

Abstract

Polycrystalline cadmium sulfide(CdS) thin films were deposited on glass substrate by chemical bath deposition(CBD) and vacuum evaporation(VE) techniques. VE-CdS films consisted primarily of hexagonal phase, whereas CBD CdS films containing primarily the cubic form. VE-grown films were shown to have better crystallinity than CBD-grown films. The grain size of the CBD films is smaller than the ones of VE films. VE-CdS films exhibited relatively high transmittance in the above-gap region and band gap compared with CBD films. However, CdTe solar cells with these low quality CBD-CdS layers yield higher and more stable characteristics. Current-voltage-temperature measurements showed that the current transport for both cells was controlled by both tunneling and interface recombination but the cells with CBD-CdS displayed less tunneling.

Key Words : Cadmium sulphide; chemical bath deposition, Vacuum evaporation; solar cells

1. 서론

CdTe는 energy band gap이 1.45 eV로서 태양광 에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 최적 이론값에 해당하는 에너지 밴드 갭(energy band gap)을 가지고 있으며, 밴드 갭 이상의 파장영역에서의 광흡수 계수가 10^4 cm^{-1} 이상으로 매우 크기 때문에 얇은 두께에서도 태양광 에너지의 대부분을 흡수하여 박막 형태로 태양전지를 제작이 가능하다 [1,2]. 또한 CdTe를 이용하여 태양전지를 제작할 경우 광흡수 거리가 짧고 표면재결합속도가 크기 때문에 대부분 동종접합(homojunction)보다는 이종접합(heterojunction) 형태로 제조된다[3].

한편, CdS는 밴드 갭이 약 2.4 eV 정도로서 CdTe, CuInSe₂ 이종접합 태양전지의 가장 적절한 창층(window layer) 물질로 인식되고 있다[4]. 태양전지로의 응용을 위한 CdS 박막 물성으로는 적절한 전기 전도도($10^{16} \text{ carrier/cm}^3$) 및 가시광 영역에서의 높은 광 투과율로서, 이러한 물성들은 제조 방법 및 증착 조건에 따라 크게 변화된다[5]. 높은 변환효율을 갖는 CdS-CdTe 태양전지에서 CdS 박막은 spray pyrolysis[6], 진공 증착법(VE: vacuum evaporation)[7,8], CBD(chemical bath deposition)법[9-11] 등에 의해 제조되는데, 이 가운데 진공 증착법 및 CBD법은 박막 제조가 용이할 뿐만 아니라 저렴한 가격으로 대면적의 지상용 태양전지를 제작할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 진공 증착법 및 CBD법으로 CdS 박막을 제조하고, 제조 방법에 따른 박막 물성을 비교하였다. 또한 CdS-CdTe 이종접합을 제작하여 CdS 층의 제조 방법에 따른 전기적 특성을 조사하였다.

1. 군산대학교 전자정보공학부
(전북 군산시 미룡동 산 68)
a. Corresponding Author : jhyi@kunsan.ac.kr
접수일자 : 2004. 11. 26
1차 심사 : 2005. 1. 12
심사완료 : 2005. 2. 3

2. 실험방법

CdS 박막을 증착시킬 기판으로는 Corning 7059 유리와 ITO(indium tin oxide)가 코팅된 투명전도성 유리를 세제액으로 세척한 후 질소 gun으로 건조하여 사용하였다. 먼저 CBD법에 의한 CdS 박막 제조를 위해 Cd과 S 이온 공급원으로 각각 cadmium acetate($Cd(CH_3COO)_2$, $Cd(Ac)_2$), thiourea ($((NH_2)_2CS)$)를 사용하였고, complexing agent 및 pH 조절제로는 ammonia(NH_3)를 사용하였다. 또한 용액 내의 급격한 반응에 의한 많은 침전물 생성을 억제하기 위해 버퍼로 ammonium acetate (NH_4CH_3COO , NH_4Ac)를 사용하였다. 이때 $CdAc_2$ /thiourea의 비와 NH_4Ac 의 농도는 각각 0.025/0.025 M, 0.1 M으로 고정시키고, pH 11인 일정조건에서 시편을 제조하였다. 반응용기 내의 온도는 내부에 설치된 가열기를 이용하여 75 °C로 조절하였고, 50 분간 반응시켜 약 300 nm 두께의 CdS 박막을 제조하였다. 진공 증착법에 의한 CdS 박막 제조에는 저항성 가열 증착기를 사용하였다. 시편 제작을 위해 먼저 챔버(chamber) 안을 mechanical pump와 diffusion pump를 이용하여 10^{-5} Torr 이하로 배기 한 후 증착원료인 CdS(Cerac Co., 99.99 %) pallet을 텅스텐 보트(tungsten boat)로부터 증발시켜 박막을 제작하였다. 증착 중 챔버 내의 진공은 5×10^{-5} Torr 이하로 유지시켰다. 증발속도는 boat에 흐르는 전류량을 조절하여 11~17 Å/sec으로 유지시켰으며, 실험의 재현성을 위해 기판 옆에 위치한 두께 측정 센서(thickness monitor)를 사용하여 증발 속도를 측정하였다. 기판온도는 기판 지지대 위에 부착된 3개의 할로겐램프를 이용하여 250 °C로 유지시켰다.

광 흡수층인 CdTe 박막을 증착하기 전에 결정립 성장과 전도도의 향상을 위해 두 방법으로 제조된 CdS 박막을 400 °C의 온도로 20분간 수소 분위기에서 열처리하였다. 열처리 과정까지 끝난 ITO/CdS 기판은 hydrazine hydrate로 표면의 산화막을 제거한 뒤, CdTe를 300 °C의 기판온도에서 약 4~5 μm정도의 두께로 진공 증착하였다. CdTe 증착 후의 시편은 $CdCl_2$ 를 매탄올에 포화시킨 용액에 dipping한 뒤 건조시켜 질소분위기에서 450 °C로 30분간 열처리하였다. 또한 표면의 산화막 등의 불순물 제거와 표면 성분비를 Te 과잉으로 변화시키기 위하여 전극 증착 전 황산에 10 %로 희석된 크롬산칼륨 용액으로 10초간 식각하였다. 태양전지의 전면전극으로는 ITO 투명전극을 사용

하였고, 후면 전극은 상온에서 Cu와 Au를 각각 10 nm, 40 nm로 진공 증착하였다.

3. 결과 및 고찰

CBD법에 의해 제조한 CdS(CBD-CdS) 박막과 진공 증착한 CdS(VE-CdS) 박막의 결정구조를 알아보기 위하여 X-선 회절검사를 하여 그 결과를 그림 1에 나타내었다. CdS는 육방정상(hexagonal phase) 및 입방정상(cubic phase)의 두 가지 형태의 결정 구조를 가질 수 있는데, 육방정상은 25~900 °C에서 안정하다고 알려져 있다[12]. CBD법에 의해 제조된 CdS 박막의 경우 입방정상의 (111), (220), (311) 면으로부터의 반사에 해당하는 peak를 관찰할 수 있으며, (111)면 방향으로 우선방위를 가지고 성장했음을 알 수 있다. 그러나 진공 증착된 CdS 박막의 경우 육방정상의 (002), (101), (110), (103), (004), (105) 면 방향과 관련된 peak가 관찰되었다. 이러한 결과로부터 보다 높은 온도에서 성장된 VE-CdS 박막은 보다 안정된 hexagonal 구조를 가지며 성장할 확률이 높다는 것을 알 수 있다. 여러 연구자들에 의해 낮은 온도(<100 °C)에서 성장된 CdS 박막의 경우 보통 cubic 구조를 나타내며, 높은 온도(>300 °C)에서 증착된 CdS 박막은 hexagonal 결정 구조를 갖는 것이 보고되었다[13,14]. 또한 CBD법[15] 또는 MBE법[16]에 의해 제조된 준안정적인(metastable) 입방 구조를 갖는 CdS가 300 °C의 온도에서 열처리에 의해 안정한 육방정상의 결정 구조로 변환되는 것이 보고되었다. 그러나 본 연구에서는 수소 분위기의 400 °C의 온도에서 열처리한 시편의 결정 구조에는 아무런 변화를 관찰할 수 없었다.

그림 2는 SEM에 의해 관찰된 VE-CdS 및 CBD-CdS 박막의 표면 미세구조를 나타낸 것이다. CBD-CdS 박막의 경우(그림 2(a)) 열처리 전 시편에서는 0.1 μm 이하의 미세한 직경을 갖는 입자들이 관찰되었다. 또한 CdS 막 표면에서 일부 큰 입자들을 관찰할 수 있는데, 이들은 그림 1의 XRD 결과에서 어떠한 불순물에 관련된 peak도 관찰되지 않았기 때문에 CdS phase에 속하는 것임을 알 수 있다. 이 입자들은 용액 내에서 homogeneous한 반응에 의해 생성되어 CdS 박막 성장 중 표면에 흡착된 CdS 미립자들로 생각된다. 일반적으로 CBD법에 의한 CdS 박막의 제조는 알칼리 수용액 내에서 Cd^{2+} 와 S^{2-} 이온들 사이의 반응에 기초한다.

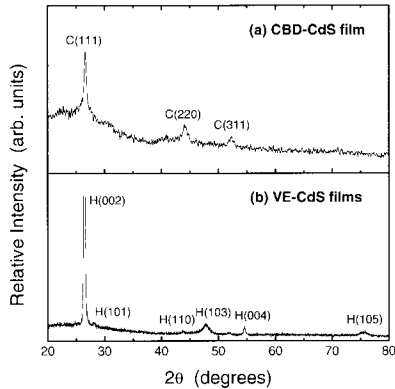
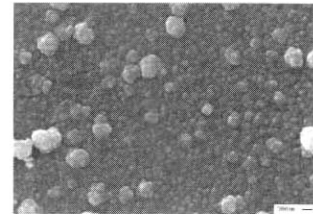


그림 1. CBD법 및 진공 증착법에 의해 제조한 CdS 박막의 전형적인 X-선 회절 pattern: (a) CBD-CdS 박막, (b) VE-CdS 박막.

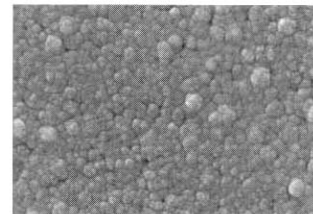
Fig. 1. Typical XRD patterns for CdS films prepared by the two methods: (a) CBD-CdS film, (b) VE-CdS film.

이때 CdS의 생성은 기판 표면에서는 heterogeneous하게 일어나 그 결과 부착력이 좋은 박막이 성장되고, 용액 내에서는 homogeneous하게 발생하여 침전물을 생성시킨다. Homogeneous한 반응은 기판 표면에 미립자들을 흡착시켜 분말상의 부착력이 나쁜 박을 생성시키므로 바람직하지 못하다. 본 연구에서 선택한 제조조건인 경우 CdS 막 성장이 기판에서의 heterogeneous한 반응에 의해 ion-by-ion 형태로 이루어질 것으로 예상하였으나 SEM 결과로부터 용액 내에서의 homogeneous한 반응이 여전히 존재함을 알 수 있다. 이러한 미립자들은 그림 2(b)에서 보듯이 400 °C의 온도로 수소 분위기에서 열처리함에 따라 제거된다. 또한 열처리에 의해 입자 크기가 0.2~0.3 μm로 약간 커짐을 볼 수 있었다. 한편, VE-CdS 박막의 경우 열처리 전 CBD-CdS보다 큰 입자 크기를 가지며, 열처리에 의해 결정립이 커짐을 그림 2(c), (d)로부터 확인할 수 있다. 그러나 제조 방법에 관계없이 열처리 전후의 박막 표면 구조에는 큰 변화를 관찰할 수 없었다.

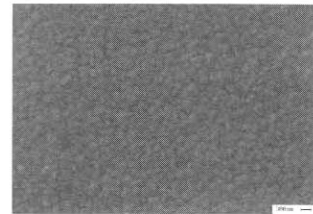
그림 3은 CBD-CdS와 VE-CdS 박막의 광투과율을 나타낸 것이다. VE-CdS가 상대적으로 높은 광투과율을 나타내는 반면, 흡수단(absorption edge)은 CBD-CdS에 비해 단파장 쪽으로 이동하



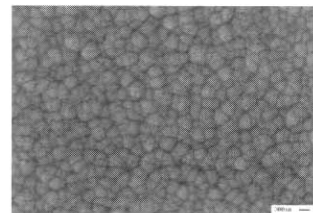
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. CBD-CdS와 VE-CdS 박막의 열처리 전후의 SEM 사진: (a), (c) 열처리 전 시편, (b), (d) 400 °C, 수소 분위기에서 열처리된 시편. (a), (b)의 경우 CBD-CdS, (c), (d)는 VE-CdS.

Fig. 2. SEM micrographs of CdS films before and after heat treatment: (a) and (c) as-grown films, (b) and (d) films annealed at 400 °C in H₂. Images (a), (b) correspond to samples prepared by CBD process, and images (c), (d) correspond to films grown by VE method.

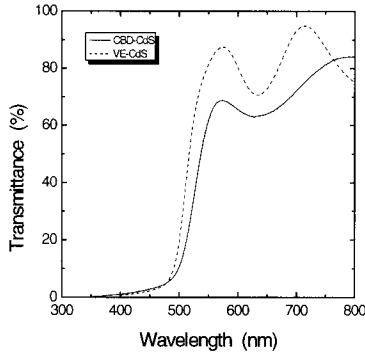


그림 3. CBD-CdS 및 VE-CdS 박막의 광투과율.
 Fig. 3. Optical transmittance spectra of CdS films deposited by CBD and VE method.

는데, 이는 밴드 갭의 증가를 의미한다. CdS와 같이 가전자대(valance band)와 전도대(conduction band)가 parabolic한 상태 밀도를 갖는 직접 천이형 반도체인 경우 입사 광자 에너지(photon energy)에 따른 흡수계수는 다음과 같이 표현될 수 있다[4].

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} / h\nu \quad (1)$$

여기서 A 는 상수, $h\nu$ 는 광자 에너지(photon energy)이고, E_g 는 광학적 밴드 갭이다. 따라서 식 (1)을 이용하여 $(\alpha \cdot h\nu)^2 - h\nu$ plot의 선형적인 부분에서 광자 에너지 축으로 외삽하여 그 절편으로부터 에너지 밴드 갭을 구할 수 있다. 그림 4는 CBD-CdS와 VE-CdS 박막의 $(\alpha \cdot h\nu)^2 - h\nu$ plot을 나타낸 것이며, 이 그래프로부터 계산된 VE-CdS 박막의 광학적 밴드 갭은 2.45 eV로 CBD-CdS의 2.37 eV보다 큰 값을 갖는다. 일반적으로 박막 내 결함들은 band tailing을 생성시키며, 그 결과 흡수단의 급격한 정도 및 밴드 갭의 감소를 가져온다[17].

CBD-CdS 박막의 반응 온도 및 VE-CdS 박막의 기판온도에 따른 전기 비저항을 그림 5에 나타내었다. 기판온도 150 °C 이하에서 제조된 VE-CdS 박막의 비저항은 CBD-CdS에 비해 현저히 낮음을 볼 수 있다. 일반적으로 CBD-CdS 박막은 VE-CdS에 비해 화학양론적 조성을 나타내는데, 그림 5에서 관찰되는 VE-CdS 박막의 낮은 비저항은 과잉 Cd(excess Cd) 및 S 공공(vacancy)과

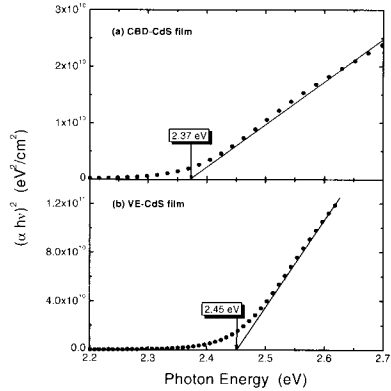


그림 4. CBD-CdS 및 VE-CdS 박막의 $(\alpha \cdot h\nu)^2 - h\nu$ plot.
 Fig. 4. $(\alpha \cdot h\nu)^2 - h\nu$ plots of typical CdS films deposited by CBD and VE method.

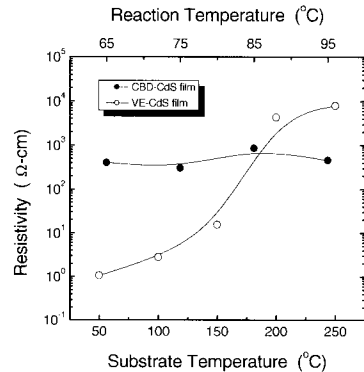


그림 5. 반응온도(CBD-CdS) 및 기판 온도(VE-CdS)에 따른 CdS 박막의 비저항.
 Fig. 5. Dependence of resistivity on reaction temperature (CBD-CdS) and substrate temperature (VE-CdS).

관련된 비화학양론적 조성에 기인한다. 그러나 기판온도가 증가함에 따라 이러한 과잉 Cd의 양이 감소하는데, 따라서 그림 5에서 기판온도에 따른 비저항의 증가는 이러한 박막의 화학적 조성 변화 때문임을 알 수 있다. 한편, CBD-CdS 박막의 경우 반응 온도에 관계없이 일정한 비저항을 나타내는데, 이러한 결과로부터 반응 온도는 박막의 조성에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

온도에 따른 전류-전압 특성은 접합에서의 전류 전도 기구(current transport mechanism)와 계면상태 등 접합면에 관한 정보를 포함하고 있으므로, 본 연구에서 제작한 CBD-CdS/CdTe와 VE-CdS/CdTe 이중접합의 전류-전압 특성을 198~348 K의 온도 범위에서 측정하였다. 측정된 데이터는 다음의 단순한 다이오드 방정식을 이용하여 분석하였다.

$$J = J_0 [\exp(q/ AkT)(V - JR_s) - 1] \quad (2)$$

여기서, A 는 다이오드의 quality factor, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대 온도, R_s 는 직렬 저항, J_0 는 역포화전류밀도(reverse saturation current density)로 다음과 같이 표현된다.

$$J_0 = J_{00} \exp(-E_a / (kT)) \quad (3)$$

여기서 J_{00} 는 온도에 따라 거의 변하지 않는 상수이며, E_a 는 활성화 에너지(activation energy)이다. 그림 6은 $\log J - V$ 곡선의 선형부분에서 전류 축으로의 외삽을 통해 구한 역포화 전류밀도를 온도에 따라 나타낸 것이다. 접합의 종류에 관계없이 측정 온도가 낮아짐에 따라 J_0 값이 감소함을 관찰할 수 있다. 따라서 두 종류의 전지에서 전류 흐름은 대부분의 온도 영역에서 터널링(tunneling)에 의해 크게 좌우되지 않음을 알 수 있다. 전류 흐름이 주로 계면 재결합(interface recombination)에 의해 조절된다면 $\log J_0$ vs. $1/T$ plot으로부터 계산된 활성화 에너지는 CdS/CdTe 접합의 built-in voltage인 1.2 eV와 같아야 한다[18]. 본 연구에서 제작된 두 종류의 접합에 대해 $\log J_0 - V$ plot의 기울기로부터 식 (3)을 이용하여 계산된 활성화 에너지는 VE-CdS/CdTe 접합의 경우 0.52 eV, CBD-CdS/CdTe 접합의 경우 0.54 eV로서 접합 종류에 관계없이 주된 전류 전도가 계면 재결합이기 위해 필요한 값보다 훨씬 작은 활성화 에너지를 갖는다.

한편, 공핍 영역(depletion region)에서의 재결합/생성이 접합에서의 주된 전류 전도 기구인지를 조사하기 위해 $\log(J_0 T^{-2.5}) - 1/T$ plot을 그림 7에 나타내었다. 만일 공핍층 내의 국재화된 상태(localized state)를 통한 재결합이 지배적일 경우 $\log(J_0 T^{-2.5})$ vs. $1/T$ plot으로부터 계산된 활성화 에너지는 CdTe 밴드 갭(300 K에서 1.45 eV)의 절반이어야 한다[19].

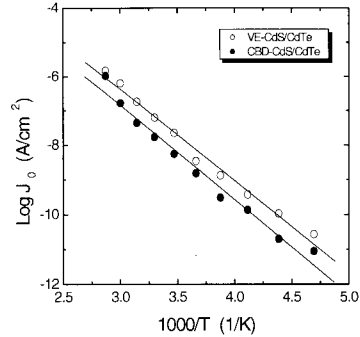


그림 6. VE-CdS/CdTe 및 CBD-CdS/CdTe 접합의 $\log J_0 - 1/T$ plot.

Fig. 6. Plots of $\log J_0$ vs. $1/T$ for the VE-CdS/CdTe and CBD-CdS/CdTe heterojunctions.

VE-CdS/CdTe 접합의 경우 이 plot의 기울기로부터 계산된 활성화 에너지는 0.46 eV이고, CBD-CdS/CdTe 접합의 경우 0.48 eV로 CdTe 밴드 갭의 절반보다 훨씬 작으므로 접합의 주된 전류 흐름이 공핍층에서의 재결합/생성에 의한 것이 아님을 알 수 있다. Miller 등은[20] 직접적인 터널링과 순수한 계면 재결합을 조합한 thermally assisted tunneling process 모델을 제안하였다. 이 모델에 따르면 voltage factor $C (=q/ AkT)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = (1 - f)B + f/\delta kT \quad (4)$$

여기서 δ 는 CdS와 CdTe 사이의 voltage division, B 는 온도에 무관한 터널링 파라미터, f 는 터널링 정도를 정량화하는 파라미터이다. 단순한 터널링의 경우 f 는 0이지만 단순한 계면 재결합인 경우 $f = 1$ 이다. $1/T$ 축으로의 절편과 $C - 1/T$ plot의 기울기로부터 $(1-f)B$ 와 f/δ 값을 구할 수 있다. CBD-CdS/CdTe 및 VE-CdS/CdTe 접합에 대한 $(1-f)B$ 값은 각각 8.3 V^{-1} 과 7.7 V^{-1} 이었으며, f/δ 는 0.29와 0.34이었다. 이러한 결과들로부터 CdS 박막의 제조 방법에 관계없이 CdS/CdTe 접합의 경우 계면 재결합과 tunneling의 조합에 의한 전류 전도가 주된 기구이며, 터널링의 정도가 VE-CdS 쪽이 CBD-CdS에 비해 높음을 알 수 있다.

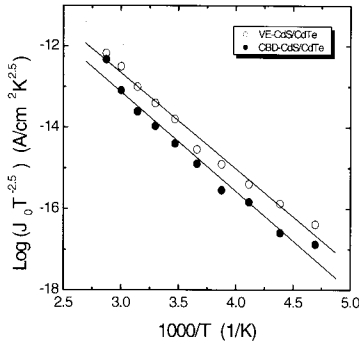


그림 7. VE-CdS/CdTe 및 CBD-CdS/CdTe 접합의 $\log J_0 T^{-2.5} - 1/T$ plot.

Fig. 7. Plots of $\log J_0 T^{-2.5}$ vs. $1/T$ for the VE-CdS/CdTe and CBD-CdS/CdTe heterojunctions.

4. 결론

Chemical bath deposition법과 진공 증착법을 이용하여 CdS 박막을 제조하고 제조 방법에 따른 물성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

CdS 박막의 결정구조는 증착 방법에 크게 의존하는데, 진공 증착법에 의해 제조된 시편은 육방정상으로, chemical bath deposition법의 경우 입방정상의 결정 구조를 가짐을 알 수 있었다. 광학적 밴드 갭은 진공 증착법에 의한 시편이 chemical bath deposition법에 의해 제조한 시편보다 큰 값을 갖는다. 전기 비저항의 경우 진공 증착법에 의해 제조된 시편은 기판 온도에 따라 박막 내 조성비의 변화로 인해 증가하지만, chemical bath deposition법의 경우 반응온도에 관계없이 일정한 비저항 값을 나타내었다. 한편 CdS/CdTe 이중접합의 전류-전압 특성을 조사한 결과 전류 전도가 계면 재결합 및 터널링에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] T. L. Chu and Shirley S. Chu, "Recent progress in thin-film cadmium telluride solar cells", Progress in photovoltaics research and application, Vol. 1, p. 31, 1993.
- [2] G. H. Bauer, "Thin film solar cell materials", Applied Surface Science, Vol. 70/71, p. 650, 1993.
- [3] K. W. Mitchell, A. L. Fahrenbruch, and R. H. Bube, "Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe", J. Appl. Phys., Vol. 48, p. 829, 1977.
- [4] 이재형, D. Mangalaraj, 이준신, "CdS 박막의 구조적 및 광학적 물성에 미치는 아르곤 빛 질소 이온 주입 효과", 전기전자재료학회논문지, 15권, 6호, p. 471, 2002.
- [5] A. I. Oliva, R. Castro-Rodriguez, O. Solis-Canto, V. Sosa, P. Quintana, and J. L. Pena, "Comparison of properties of CdS thin films grown by two techniques", Applied Surface Science, Vol. 205, p. 56, 2003.
- [6] Kodigala Subba Ramaiah, V. Sundara Raja, and Maheshwar Sharon, "Optical and structural investigations on spray-deposited CdS films", J. Mater. Sci.: Materials in Electronics, Vol. 9, p. 261, 1998.
- [7] A. Ashour, N. El-Kadry, and S. A. Mahmoud, "On the electrical and optical properties of CdS films thermally deposited by a modified source", Thin Solid Films, Vol. 269, p. 117, 1995.
- [8] H. Bayhan and C. Ercelesi, "Electrical characterization of vacuum-deposited n-CdS/p-CdTe heterojunction devices", Semicond. Sci. Technol., Vol. 12, p. 600, 1997.
- [9] 이재형, 송우창, 남준현, 박용관, 신성호, 박광자, "CdS/CdTe 태양전지 특성에 미치는 CdTe 박막의 기판온도 영향에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 10권, 4호, p. 369, 1997.
- [10] Paul O'Brien and Tahir Saeed, "Deposition and characterization of cadmium sulfide thin films by chemical bath deposition", J. Crystal Growth, Vol. 158, p. 497, 1996.
- [11] C. Guillén, M. A. Martínez, and J. Herrero,

- “Accurate control of thin film CdS growth process by adjusting the chemical bath deposition parameters”, *Thin Solid Films*, Vol. 335, p. 37, 1998.
- [12] T. L. Chu, Shirley S. Chu, N. Schultz, C. Wang, and C. Q. Wu, “Solution-grown cadmium sulfide films for photovoltaic devices”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 139, No. 9, p. 2443, 1992.
- [13] K. E. Assali, M. Boustani, A. Khiara, T. Bekkay, A. Outzourthit, E. L. Ameziane, and J. C Bernade, J. Pouzet, *Phys. Stat Solid A*, Vol. 178, p. 701, 2000.
- [14] H. Sakai, T. Tamaru, T. Sumomogi, H. Ezumi, and B. Ullrich, “Crystal direction of CdS thin film produced by laser ablation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 7A, p. 4149, 1998.
- [15] O. Zelaya-Angel, J. J. Alvarado-Gil, R. Lozada-Morales, H. Vargas, and A. Ferreira da Silva, “Band gap shift in CdS semiconductor by photoacoustic spectroscopy: Evidence of a cubic to hexagonal lattice transition”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, p. 291, 1994.
- [16] M. Kobayashi, S. Nakamura, K. Kitamura, H. Umeya, A. Jia, A. Yoshikawa, M. Shimotomai, Y. Kato, and K. Takahashi, “Luminescence properties of CdS quantum dots on ZnSe”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17, p. 2005, 1999.
- [17] Y. Shiraki, T. Shimada, and K. F. Komatsubara, “Ion implantation of nitrogen into cadmium sulfide”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 43, p. 710, 1972.
- [18] J.-B. Yoo, A. L. Fahrenbruch, and R. H. Bube, “Transport mechanisms in ZnO/CdS/CuInSe₂ solar cells”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, p. 4694, 1990.
- [19] S. K. Das, “Variation of properties of electrodeposited CdS/CdTe solar cells deposited onto different transparent conducting oxide substrates”, *Thin Solid Films*, Vol. 226, p. 259, 1993.
- [20] W. A. Miller, L. C. Olsen, *IEEE Trans. Electron. Devices*, Vol. 31, p. 654, 1984.