

CdTe 박막 태양전지의 기술동향

글 _ 윤재호, 안병태*, 김동환** || 한국에너지기술연구원 태양전지연구센터,
*한국과학기술원 신소재공학과, **고려대학교 재료공학부
yunjh92@kier.re.kr

1. CdTe 태양전지의 개요

기존의 전력과 비교해서 가격경쟁력을 가지지 위해서는 박막형 태양전지의 개발이 중요하다. 박막 태양전지의 경우 단결정 다결정 실리콘의 비해 원가비중이 현저하게 낮기 때문에, 기술개발을 통한 효율 증가를 이룰 수 있다면 가격경쟁력을 가질 수 있게 된다. 특히 화합물 반도체 태양전지의 경우 박막 실리콘 태양전지에 비해 더욱더 얇은 박막으로 태양전지를 만들 수 있어 원가절감 효과를 극대화 할 수 있다. 실리콘의 경우 빛을 효과적으로 흡수하기 위해서는 100 μm 이상의 박막을 증착해야 하는 반면, 광흡수계수가 높은 화합물 태양전지의 경우 1 μm 만으로도 충분히 빛을 흡수할 수 있기 때문이다.

특히 CdTe는 두 가지 측면에서 태양전지에 이상적인 물질로 간주되고 있다. 첫 번째는 에너지 갭이 1.45 eV 인 직접천이형 반도체로 태양에너지의 스펙트럼을 고려했을 때 에너지 변환에 가장 적합하고¹⁾ 두 번째로는 다양한 방법을 이용하여 높은 증착속도로 박막을 균일하게 증착할 수 있다는 것이다. 제조방법의 다양성은 제조단가의 감소를 가능하게 하며 이러한 특성은 상용화에 결정적 요인으로 작용하게 된다.

일반적으로 기판온도가 450°C 이상이 되면 조성비가 일정하고 안정적인 박막이 형성되며²⁾ 고온에서 생성된 박막은 약간의 Cd vacancy에 의해 p-type을 나타낸다고 알려지고 있다.³⁾ 또한 CdTe의 junction partner로는 격자 불일치가 매우 적은 CdS를 적용하여 n-CdS/p-CdTe 이중접합을 구성한다.⁴⁾ N-type CdS는 In₂O₃, SnO₂, Indium Tin Oxide 와 같은 투명전극이 증착된 유리기판에 증착

한다.⁵⁾ 그 후 광흡수층인 CdTe를 증착하고 마지막으로 배면전극 물질을 증착한다.

광상태에서는 전하가 p-type CdTe의 전기장 발생지역에서 많이 생성되기 때문에 전하의 수집은 확산보다는 내부 전기장에 의해 결정된다. 또한 도핑농도가 높은 CdS에서는 내부 전기장이 거의 발생되지 않고 minority carrier life time 또한 매우 작아서 광전압 반응에 있어서 CdS는 큰 역할을 하지 못한다. 따라서 빛의 투과를 최대한으로 하기 위해서 CdS의 두께는 최소화되어야 한다.³⁾

CdTe 태양전지 제조에 있어서 가장 중요한 것은 CdTe를 증착하는 것이다. 일반적으로 결정성과 전하의 이동도가 우수한 CdTe를 1.5-6 μm 정도의 두께로 증착하는데 그 증착법 또한 매우 다양하다. 근접승화법(Close spaced sublimation, CSS),^{6,7)} chemical spraying,⁸⁾ 전착법(electrodeposition),¹⁾ screen printing,⁹⁾ 화학기상증착법(MOCVD),²⁾ sputtering²⁾법 등이 이용되고 있다. 이러한 방법들로 증착된 CdTe 태양전지는 10-16%의 효율을 보고하고 있으며 세계 최고 효율은 근접승화법을 이용하며 만든 것으로 16.0%와⁷⁾ 16.4%를¹⁰⁾ 보고하고 있다. 근접승화법은 진공증발법을 발전시킨 것으로 소스와 기판사이의 간격을 매우 짧게 하여 증착하는 방법이다. Borosilicate glass 기판에서 기판온도가 600°C 근처에서 제조한 태양전지가 고효율을 나타내고 있으며 값이 싼 sodalime glass 기판은 온도를 높게 올리지 못함으로 인해 지금 현재 12%대의 효율에 머물러 있다.¹¹⁾ 근접승화법의 경우 증착속도가 매우 빨라 대면적의 태양전지를 제조하는데 있어서 매우 용이하다. 미국의 First Solar, 독일의 ANTEC 같은 회사들도 이러한 근접승화법을 이용하여 연간

10MW 이상의 CdTe 태양전지를 제조하고 있다.¹²⁾

Table 1.2는 여러 가지 방법으로 제조한 CdTe 태양전지의 기술개발과 생산현황을 나타내고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 전 세계적으로 많은 연구그룹과 회사에서 CdTe 태양전지를 연구하고 있으며 소면적, 대면적 태양전지에서 효율증가를 꾀하고 있다. 대표적으로 Matsushita Battery사에서는 화학기상증착법으로 매우 얇은 CdS를 증착하여 단과장에서 빛의 흡수를 증가시켜 16.0%의 태양전지를 얻었다.⁷⁾ 미국의 NREL에서 두 가지 새로운 기술을 이용하여 16.4%의 효율을 보고하였다.¹⁰⁾ 첫 번째로 기존의 투명전극을 Cd₂SnO₄(CTO)로 교체하는 것이고 두 번째로는 Zn₂SnO₄(ZTO) 막을 투명전극과 CdS 사이에 첨가하였다는 것이다. ZTO와 CdS의 내부확산은 태양전지의 광전압 특성과 재현성을 증가시켰다고 보고하고 있다.

이렇게 광흡수층과 광투과층의 특성개선을 통해 초기 효율은 증가하고 있지만 CdTe 태양전지에서 가장 중요하게 해결해야 할 과제는 여전히 저항이 낮고 안정성있는 배면전극을 형성하는 것이다. CdTe의 일함수가 매우 크고 self-compensation 특성으로 인해 p-type doping이 매우 어렵기 때문에 ohmic 접합을 형성하기가 매우 어렵다. 배면전극을 형성하는 방법은 비교적 일함수가 큰 금속을 증착하거나 Cu를 doping하는 방법 그리고 p+ 반도체를 증착하는 것이다. 현재 Au,¹³⁾ Cu/Au,¹⁴⁾ Te,¹⁵⁾ Ni/Al,¹⁶⁾ ZnTe:Cu,¹⁷⁾ HgTe¹⁸⁾ 그리고 Cu-doped graphite¹⁰⁾ 등의 물질들이 배면전극으로 사용되고 있다. 이 중에서 고효율을 보고하는 방법은 Cu를 doping 하거나 Cu-doped carbon을 사용하는 것이다. 하지만 Cu의 경우 Cu의 확산에 의해서 태양전지의 degradation 현상이 일어난다고 보고되고 있으며¹⁹⁾ carbon의 경우 시간이 경과함에 따라 주위의 수분 등과 반응하여 역시 degradation 된다고 알려져 있다. 그리고 이 경우에도 Cu를 사용하기 때문에 Cu 확산의 문제도 존재하게 된다. 그래서 일부 연구자들은 Cu 보다 원자 반지름이 큰 Sb를 이용한 배면전극에 대한 연구를 진행하고 있다.²⁰⁾ 하지만 아직도 Cu를 이용한 배면전극이 가장 높은 효율을 보고하고 있다.

최근에는 기존의 태양전지 효율의 한계를 극복하고자

2개 이상의 다층 구조의 태양전지를 제조하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구방향은 태양전지의 종류에 관계없이 진행되고 있는데 에너지 밴드갭이 다른 물질을 사용함으로써 태양에너지를 좀더 효율적으로 사용할 수 있게 된다. CdTe 태양전지의 경우에도 기존의 기술을 바탕으로 CdTe내에 Mn 혹은 Zn 등을 첨가하여 에너지 밴드갭을 변화시키는 연구가 진행 중이며 기존의 CIS 태양전지와는 다층 태양전지의 제조도 연구되고 있다. 또한 CdTe 태양전지의 있어서 많이 지적되고 있고 상용화의 걸림돌로 되고 있는 Cd의 독성에 대한 문제도 셀 capping과 원래로의 recycling system 의 발전으로 해결을 모색하고 있다.

2 CdTe 태양전지의 구조 및 공정

앞서 언급한 바와 같이 CdTe 태양전지는 기본적으로 CdS(광투과층)와의 이종접합을 기본으로 하며 전면 투명전극과 배면전극으로 구성된다. CdTe 태양전지의 구조는 Fig. 1에서 나타내고 있으며 각 단위박막의 특징 및 공정은 아래와 같다.

2.1 광흡수층

CdTe는 Sputtering, Evaporation, Electrodeposition 등 다양한 방법으로 제조가 가능하지만 일반적으로 CSS(close-spaced sublimation) 법이고 불리는 공정으로 광흡수층을 증착한다. CSS법은 장치가 간단하고 유지가 간편하며, 특히 소오스와 기판과의 간격이 수 mm정도에

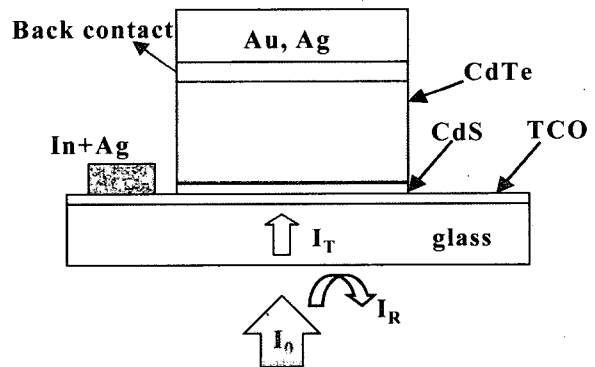


Fig. 1. CdTe 태양전지의 구조

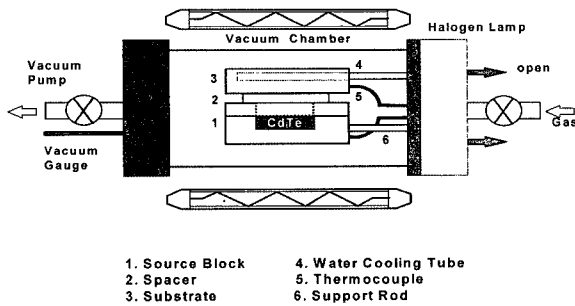


Fig. 2. CSS 반응챔버의 개략도

지나지 않아 빠른 증착 속도로 대면적 태양전지를 제조하기 적합한 방식이다. CSS법 장치는 반응챔버, 할로젠 램프, gas 분배 및 연결부, 진공펌프 및 기타 제어판으로 구성된다. 반응챔버의 상부와 하부에는 소오스와 기판의 온도 조절을 위하여 각각 할로젠 램프가 장착된다. CSS 반응챔버의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 Window 층

CdS는 밴드갭이 2.42 eV이고 직접 천이형 반도체로 주로 태양 전지의 광투과층으로 사용되는 물질이다. CdS는 In, Sn, Al, Cl 또는 Br 등과 같은 shallow donor들로서 쉽게 n-type으로 도핑될 수 있다. 박막 또는 결정의 성장 과정에서 생성된 과잉의 Cd로 인해 발생된 S의 공공이 도너로 작용하므로 불순물을 첨가하지 않더라도 쉽게 0.1 Ωcm 이하의 비저항을 얻을 수 있다. Cu, Ag, and Au에 의해서 deep acceptor state가 형성되기는 하지만 쉽게 native donor에 의해서 self-compensation이 일어나기 때문에 p-type CdS를 얻기 힘들다.

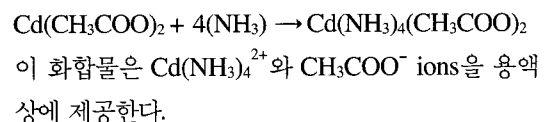
CdS를 증착하는 방법으로는 진공 증착법 (vacuum evaporation), 스퍼터링 (sputtering), 화학기상증착법 (chemical vapor deposition), 열분해법 (spray pyrolysis)과 CBD법 (chemical bath deposition) 등이 있다. CBD법은 CdS 박막이 성장하는 기판을 비롯하여 여러 종류의 화학종을 포함한 수용액에서 화학 반응을 이용하여 증착 속도를 조절하는 것이 특징이다. 용액을 이용할 때는 저온 (20~95°C)에서 성장시킬 수 있으므로, 300~450°C의 고온이 필요한 열분해법보다 다양한 기판의 사용이 가능하다. 열분해법과 스퍼터링은 증착 과정 중 CdS가 기판에

전부 증착되지 않아 소모성이 큰 것에 비해, CBD법은 용액 상에 석출된 석출물이 반응용기의 바닥에 그대로 남게 되며 이것을 필터링해서 다시 스크린-프린팅 (screen-printing)에 재사용 가능하므로 경제적으로 효율적이다. 또한, 화학기상증착법에서는 이상적인 비화학양론비를 형성하기 어려운 것에 비해 CBD법은 이상적으로 형성할 수 있다. CBD법으로 증착한 막은 우수한 광전도도와 전기적 성질을 보여 준다.

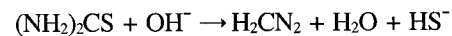
CdS 생성할 때는 반응 메커니즘은 여러 가지 학설로 나뉜다. Kitaev et. al. 은 CdS 생성시 Cd(OH)₂가 thiourea를 분해하는 촉매역할을 하므로 용액내에 반드시 존재하여야 한다고 주장한다. 이러한 증거로, P. C. Rieke et. al. 은 pH 9.0~10.4에서 표면에 Cd(OH)₂ 존재를 하였으며, 벌크에서 thiourea를 분해하는 촉매역할을 한다고 뒷받침한다. 반면, Kaur et. al. 및 Chopra et.al 은 Cd(OH)₂의 부재한 pH영역에서 실험한 결과 CdS가 생성된다고 보고하고 있다.

일반적인 CdS 박막은 cadmium salt를 포함한 알칼리 용액 (alkaline solution)에서 thiourea ((NH₂)₂CS)의 분해로 이루어진다. 암모니아 (ammonia)는 착화물 (complexing agent)이며 thiourea가 S⁻ ion을 제공하고 NH₄Ac (ammonium acetate)/NH₃는 완충제 (buffer)로 작용한다. 전형적인 반응 메커니즘은 다음과 같다.

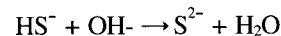
1. Cadmium salt는 ammonia와 착화물을 형성한다.



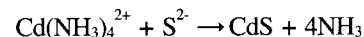
2. 이러한 complex ions은 OH⁻와 (NH₂)₂CS는 CdS의 촉매 표면으로 확산한다.
3. Alkaline medium에서 CdS 촉매 표면에 thiourea가 분해한다.



4. 2가의 sulphide ions이 형성된다.



5. 최종 CdS가 형성된다.



일반적으로, CdS의 증착 속도는 Cd(NH₃)₄²⁺가 제공하는 Cd²⁺와 (NH₂)₂CS의 가수분해에 의한 S²⁻의 농도에 의

해 결정된다. $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ 의 가수분해는 용액의 pH와 온도에 좌우된다. 용액의 온도가 80°C에서, pH가 13과 13.7일 때 가수 분해비 상수는 각각 3.8×10^{-3} 과 8.2×10^{-3} 이 된다. 이 때 용액의 온도가 100°C로 상승하면 가수 분해비 상수는 각각 1.1×10^{-2} 과 2.5×10^{-2} 이 된다. 또한, ammonia와 NH_4 -salt의 농도에 의해 다양하게 증착 속도가 조절된다.

2.3 배면전극

CdTe 태양전지에서 가장 중요하게 해결해야 할 과제는 여전히 저항이 낮고 안정한 배면전극을 형성하는 것이다. CdTe는 일함수가 매우 커서 보통의 금속전극을 사용했을 경우 p-type CdTe와 금속간에는 Schottky barrier가 형성된다. Contact barrier의 높이는 CdTe의 페르미 준위와 금속표면의 페르미 준위의 차이로 결정된다. 이러한 경우에 있어서 배면전극은 완전한 ohmic 특성을 보이지 않기 때문에 순방향으로 전압을 걸어주었을 때 배면전극에서 전압강하가 일어나게 된다.

Band diagram의 측면에서 살펴보면 CdTe와 CdS의 junction diode와 반대방향으로 배면전극으로 인한 또 다른 에너지 장벽이 발생하게 되며, 이 장벽은 순방향 전압이 걸렸을 때 정류작용을 일으켜 전체적으로 전류를 일정하게 만드는 roll over 현상을 발생시킨다.

배면전극을 형성하는 방법은 비교적 일함수가 큰 금속을 증착하거나 Cu를 doping하는 방법 그리고 p+ 반도체를 증착하는 것이다. 현재 Au, Cu/Au, Te, Ni/Al, ZnTe:Cu, 그리고 Cu-doped graphite 등의 물질들이 배면전극으로 사용되고 있다. 이 중에서 고효율을 보고하는 방법은 Cu를 doping 하거나 Cu-doped carbon을 사용하는 것이다. 소량의 Cu 첨가로 p-CdTe에 P^{++} doping layer를 형성하여 ohmic contact을 만들 수 있는데, 이러한 방법으로 몇몇 연구팀들은 초기 태양전지의 상당한 효율 향상을 보고하고 있다. Cu는 CdTe 내에서 상당히 빠른 확산 물질로 알려져 있으며, Cu 확산 mechanism은 grain boundary diffusion으로 보고 있다. Cu^+ 와 Cd^{2+} 의 이온의 크기는 비슷하여 CdTe 내에서 Cu^+ 는 Cd^{2+} site에 쉽게 substitute가 된다. 따라서 Cu의 확산은 CdTe의 거의 전영역에 걸쳐 일어난다고 보고 있으며, 때로는 CdS/CdTe junction

영역까지 Cu가 확산되었다는 결과도 보고하고 있다. 이러한 junction과 CdTe 막 내의 Cu는 recombination center와 shunt pathway로 작용해 태양전지의 특성 저하의 원인이라 보고 되고 있다.

근래에는 Cu가 포함되지 않는 배면 전극 물질이 제안되고 있으며, 이런 예로 Ni:P, Sb_2Te_3 , HgTe 등이 있다. 위의 배면 전극 물질을 사용한 태양전지의 경우 상당한 안정성은 보여주고 있지만, 초기 효율은 그다지 높지 않은 것으로 보고하고 있다. Stress 가속 실험을 통해서 Cu 함유 배면 전극 물질의 경우 250 시간 정도의 lifetime을 보이지만 이런 배면 전극 물질의 경우 1000시간 이상의 lifetime을 보고하고 있다.

3. 국외 개발현황

CdTe 전지의 효율은 현재 미국의 NREL의 16.4%가 세계 기록이며, NREL의 CdTe 그룹은 투명 전극으로 전도도와 투과도가 좋은 cadmium stannate(Cd_2SnO_4)와, Cd_2SnO_4 와 CdS 층 사이에 zinc stannate (Zn_2SnO_4 , or ZTO) buffer layer를 사용하였다. 또한 여타 그룹에서 현재 연구되고 있는 과제로서는 전기저항이 낮은 후면전극(또는 배면전극, back contact) 개발, CdTe층의 전기전도도 향상, CdTe/CdS 계면의 최적화, 밴드갭이 크고 격자 상수가 CdTe와 비슷한 window layer material의 개발, 투명전극의 개발 등이 있다.

현재 국제적으로 이 분야를 선도하고 있는 연구그룹을 Table 1, 2에 정리하였다. Table 1에 나타난 경향을 요약하면 다음과 같다. 여러 그룹이 다양한 방법을 사용하여 CdTe 층을 합성하였는데 이는 CdTe가 합성하기 쉽고 따라서 대량생산에 적합하다는 사실을 뒷받침한다.

CdTe 기술은 First Solar Inc. (미국), BP Solar (영국), Matsushita Batteries (일본) 등의 산업체에서 개발되었으며 일부 pilot plant scale (수백 kW) 정도의 시스템이 가동되고 있다. 특히 미국의 경우 전력계통의 인프라가 갖춰져 있지 않은 제삼세계 국가들(남미, 인도, 아프리카 등지)을 대상으로 대규모의 발전소 설립을 적극적으로 추진하고 있다.

Table 1. 소면적 CdTe 태양전지의 효율

Method (CdS/CdTe)	Area(cm ²)	Eff(%)	Organization	Year
CBD/CSS	1.131	16.4	NREL	2001
MOCVD/CSS	1.0	16.0	Matsushita Battery	1997
CBD/CSS	1.08	15.8	Univ. of S. Florida	1993
MOCVD/CSS	1.0	15.3	Tokyo Inst. Tech.	1999
CSS/CSS	0.8	15.0	Univ. of S. Florida	1997
CBD/Evap	0.02	14.2	BP Solar	1991
ALE/ALE	0.12	14.0	Micro-chemistry	1999

Table 2. 대면적 CdTe 태양전지의 효율

Method (CdS/CdTe)	Area(cm ²)	Eff(%)	Organization	Year
CBD/EDepo	8670	10.6	BP Solar	2000
MOCVD/CSS	5413	11.0	Matsushita Battery	2000
E. Depo/E. Depo	706	10.1	BP Solar	1991
V.Trans/V.Trans	6278	9.1	First Solar	1996
CSS	86	10.5	ANTEC	2000
Screen printing	1200	8.7	Matsushita	1995
Chemical spraying	3528	9.2	Golden Photon	1999

4. 국내 개발현황

국내에서는 한국과학기술원에서 screen printing 법으로 CdTe를 합성하는 연구가 진행되어 12%를 상회하는 효율을 발표하기도 하였으나 저항치가 낮고 성능이 안정된 후면전극을 개발하는 등의 문제에 봉착해 있는 것으로 보인다. 최근에는 근접증착법을 이용하여 14%의 효율을 얻었으며 Cu₂Te 전극을 개발하여 저항이 매우 낮으면서도 안정성이 뛰어나 전극을 개발하였다(Fig. 4).

그러나 기존의 국내연구는 재료의 물성탐구 및 효율향상을 위한 공정연구에 치우쳐 있으며, 실제 상용화에 필요한 대면적화 방안에 대해서는 연구개발이 수행되지 않고 있다. 또한 공정이 안정화 되어있지 않기 때문에 태양전지의 에너지 변환효율이 불규칙한 실정이다.

5. 기술상의 문제점 및 향후 전망

현재 CdTe 태양전지 에너지 변환효율은 NREL의 CdTe 그룹이 2001년에 close-spaced sublimation 방법으로 달성한 16.4% (크기: 1.131 cm²)가 최고 기록이다. 앞서 언급한 바와 같이 CdTe 태양전지의 기술적인 이슈는 크게 CdS/CdTe 접합과 배면전극의 문제로 나눌 수 있

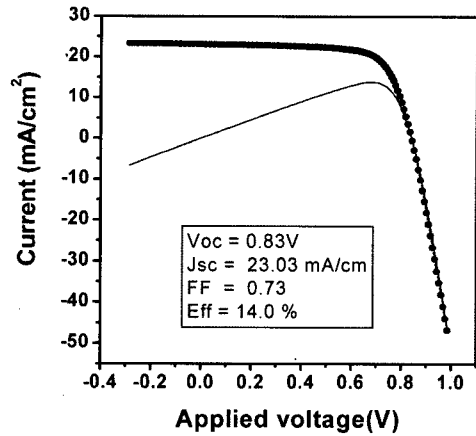


Fig. 3. CdTe 태양전지의 전류-전압 곡선.

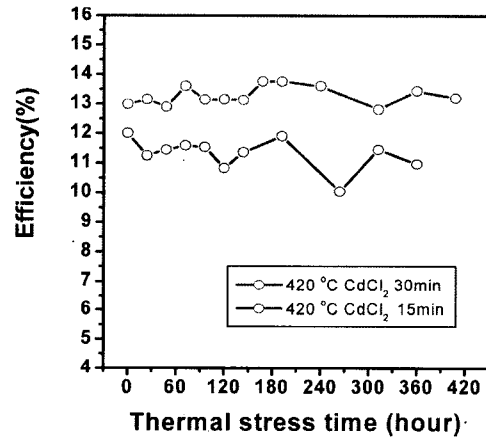


Fig. 4. 60°C 질소분위기에서의 태양전지의 효율 변화.

다. CdS 박막은 CdTe의 junction-partner로 유리한 특성을 가지고 있지만 또한 광투과 손실 및 격자 불일치 문제들을 가지고 있다. 따라서 투명전극 및 광투과층에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 또한 CdCl₂ 분위기에서의 열처리의 효과를 규명하여 접합특성을 개선하는 연구도 진행중이다. 앞으로 back contacts 부분에서의 전기저항을 낮추고, CdTe층의 전기전도도 향상, CdTe/CdS 계면의 최적화, 밴드갭이 크고 격자상수가 CdTe와 비슷한 window layer material의 개발 등의 기술적인 문제가 해결되면 19%까지 향상될 것으로 보고 있다. 또한 NREL을 중심으로 CIS계 탠덤구조 태양전지의 top-cell로 적용하는 연구도 활발히 진행 중이며 이미 15%대의 효율을 보고하고 있다. 이후 CdTe 태양전지의 중요한 응용분야가 될 것으로 보인다.

참고문헌

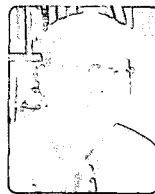
1. A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, "Fundamentals of Solar Cells", Academic Press, New York London (1983).
2. K. Zanio, Cadmium Telluride; Material Preparation; Physics; Defects and Applications, in Semiconductors and Semimetals Vol 13, Academic Press 1978.
3. W. Fuhs and R. Klenk, Proc. 2nd WCPSEC, Vienna, July 381 (1998).
4. K. W. Mitchell, A. L. Fahrenbruch, and R. H. Bube, J. Appl. Phys., 48, 829(1977).
5. V. Ramanathan, L. A. Rassel, C. H. Liu, and P. V. Meyers, Solar Cells, 28, 129 (1990).
6. T. Armoto, S. Kumazawa, H. Higuchi, T. Arita et. al., Jpn. J. Appl. Phys., 10, 6304 (1997).
7. C. Ferekides, J. Britt, Y. Ma, L. Kilian, Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conf. 389 (1993).
8. S. Albright, Proc. NREL PV AR & D 11th review Meeting, New York, May 1992.
9. J. S. Seol, H. B. Im, and J. T. Moon, Thin Solid Films, 214, 207 (1992).
10. NC-PV NEWS 2001, 4.
11. D. Bonnet, B. Henrichs, H. Richter, Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf. 1165 (1991).
12. D. Bonnet, Proc. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conf. 2688 (1997).
13. A. Niemegeers and M. Burgelman, J. Appl. Phys., 81(6), 15 (1997).
14. S. K. Das, G.C. Morris, J. Appl. Phys., 72, 4940 (1992).
15. H. Uda, S. Ikegami, et. al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 50, 141 (1998).
16. R. W. Miles, et. al., J. Crystal Growth 161, 148 (1996).
17. L. Feng, D. Mao, J. Tang, J. Electronic Materials, Vol 25, No. 9, (1996).
18. J. Britt and C. Ferekides, Appl. Phys. Lett., 62, 2851 (1993).
19. K. D. Dobson, Iris Visoly-Fisher, et. al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 62 295 (2000).
20. N. Romeo, A. Bosio, R. Tedeschi, et. al. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 58 209 (1999).

◎◎ 윤재호



- * 1997년 한국과학기술원 재료공학과(학사)
- * 1999년 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- * 2004년 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- * 현재 한국에너지기술연구원 태양전지연구센터 선임연구원

◎◎ 안병태



- * 1977년 서울대학교 재료공학과(학사)
- * 1979년 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- * 1989년 Stanford Univ. 재료공학과(박사)
- * 현재 한국과학기술원 신소재공학과 교수

◎◎ 김동환



- * 1982년 한국과학기술원 금속공학과(학사)
- * 1984년 한국과학기술원 금속공학과(석사)
- * 1992년 Stanford Univ. 재료공학과(박사)
- * 현재 고려대학교 재료공학부 교수