

Special

Thema | 화합물 박막 태양전지 기술동향

1. 서론

윤재호 선임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

안병태 교수

(한국과학기술원 신소재공학과)

윤경훈 책임연구원

(한국에너지기술연구원 태양광발전연구단)

태양전지의 종류는 형태와 재료등으로 구분될 수 있는데 화합물 박막 태양전지는 일반적으로 CuInGaSe_2 (CIGS)로 대표되는 I-III-VI₂ 족 화합물과 CdTe로 대표되는 II-VI족 화합물을 말한다. 우주용 태양전지로 응용되고 있는 III-V 족의 경우는 화합물 박막 태양전지의 범주에 포함되지 않는다. CIGS와 CdTe는 직접천이형 에너지밴드갭을 가지고 있고, 광흡수계수가 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 로 반도체중에서 가장 높아(그림1) 수 μm 의 박막으로도 고효율의 태양전지 제조가 가능하고, 또한 장기적으로 전기광학적 안정성이 매우 우수한 특성을 지니고 있다. 미국의 NREL에서는 최근 19.5%의 CIGS 태양전지 최고 효율을 보고 하였는데[1], 이는 일부 실용화되어 있는 실리콘계 박막 태양전지에 비해서도 높을 뿐만 아니라 기존의 다결정 실리콘 태양전지의 최고효율에 근접하는 것이다. CdTe 태양전지의 경우, 실험실 단위에서의 최고 효율은 16.4%로 CIGS 보다 조금 낮지만 생산단가가 낮아 상용화가 활발히 진행되고 있다. 따라서 화합물 박막 태양전지는 현재 사용되고 있는 고가의 결정질실리콘 태양전지를 대체하여 태양광발전의 경제성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 대안으로 부각되고 있다.

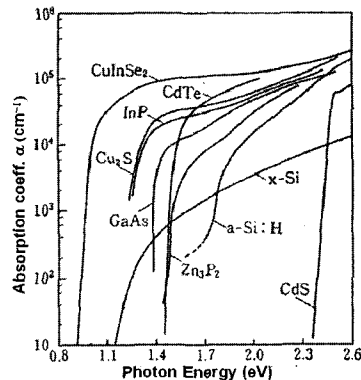


그림 1. 태양전지 재료별 흡수계수.

2. CIGS 박막 태양전지

2.1 CIGS 박막 태양전지의 구조

CIGS를 광흡수층으로 하는 태양전지의 구조는 그림2와 같다. 일반적으로 유리를 기판으로 5개의 단위 박막-배면전극, 광흡수층, Buffer층, 앞면 투명전극, 반사방지막을 순차적으로 형성시켜 만든다. 단위박막별로 다양한 종류의 재료와 조성, 또한 제조방법에서는 갖가지 물리적, 화학적 박막 제조방법이 사용될 수 있다.

2.1.1 기판

기판의 재질로는 일반적으로 유리가 사용되고 있다. 그 밖에 알루미늄과 같은 세라믹 기판, 스테인레스 스틸, Cu Tape 같은 금속 기판, 폴리머 등도 사용이 가능하다. 유리 기판으로 값싼 소다회 유리(Sodalime Glass)를 사용한다. 미국 NREL이 기록한 19.5%의 변환효율도 소다회 유리를 기판으로 사용한 것이다. 소다회 유리 기판은 코닝 유리 기판에 비

해 저렴하다는 장점을 가지고 있기 때문에 공정온도의 한계(600 °C)가 있음에도 불구하고 기판재료로 사용되었다. 하지만 90년대 이후 연구가 진행되면서 소다회 유리에서 확산된 Na 이 태양전지의 광전압 특성을 향상시킨다는 사실이 알려지게 되었고 최근에는 CIGS 태양전지에서 소다회 유리가 가장 널리 사용되고 있다[2].

2.1.2 배면전극

Ni, Cu를 배면전극으로 시도된 바가 있으나 Mo이 가장 광범위하게 사용된다. 이는 Mo이 가진 높은 전기전도도, CIGS에의 Ohmic Contact, Se 분위기 하에서의 고온 안정성 때문이다. Mo 박막의 제조는 D.C. Sputtering이 가장 널리 이용되고 있다.

Mo 박막은 전극으로서 비저항이 낮아야 하고 또한 열팽창계수의 차이로 인하여 박리현상이 일어나지 않도록 유리기판에의 점착성이 뛰어나야 한다. 여기서 가장 중요한 변수가 박막제조 중 Ar과 산소의 분압이다. Ar 분압을 높여 점착성이 좋은 막을 얇

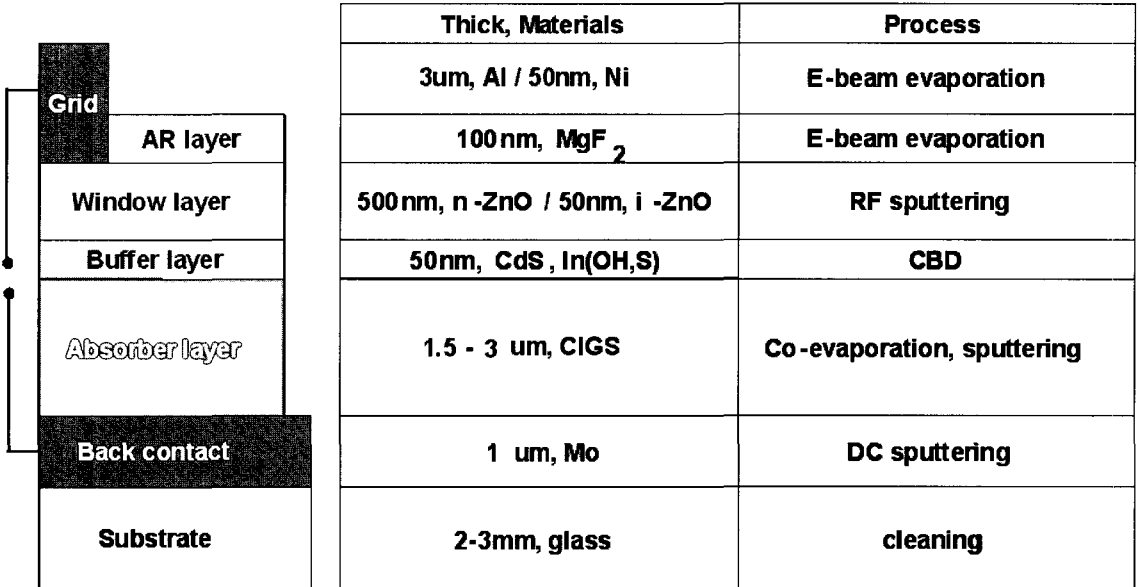


그림 2.

게 형성시키고 그 위에 저항이 낮은 박막을 형성하는 2중 구조를 통하여 높은 점착성과 낮은 비저항의 배면전극을 형성하고 있다.

2.1.3 광흡수층

CIGS 박막은 다원화합물이기 때문에 제조공정이 매우 까다롭다. 물리적인 박막제조방법으로는 진공 증발법(Evaporation), Sputtering + Selenization, 화학적인 방법으로는 Electrodeposition 등이 있고, 각 방법에 있어서도 출발물질(금속, 2원 화합물 등)의 종류에 따라 다양한 제조방법이 동원될 수 있다. 현재까지 가장 좋은 효율을 얻을 수 있었던 것은 Evaporation(그림3)방법으로 출발물질로 4개의 금속원소-Cu, In, Ga, Se-를 사용한 것이다. CIS 박막의 특성은 이와 같이 박막의 조성뿐만 아니라 기판의 온도, 증착시간 등에 의해서도 크게 변하기 때문에 엄밀한 공정 제어가 필수적이다. 현재까지의 최고 변화효율 19.5% Cu(In,Ga)Se₂ 는 3단계 동시진공증발방법으로 얻은 것이다.

2.1.4 Buffer층

CIS 태양전지는 p형 반도체인 CuInSe₂ 박막과 n형 반도체로 Window 층으로 사용되는 ZnO 박막이 pn 접합을 형성한다. 하지만 두 물질은 격자상수와 에너지밴드갭의 차이가 크기 때문에 양호한 접합을 형성하기 위해서는 밴드갭이 두 물질의 중간에 위치하는 Buffer 층이 필요하다. 현재 가장 높은 효율의 태양전지에 사용되고 있는 것은 CdS이다.

CdS박막은 CBD(Chemical Bath Deposition) 방법

을 사용하여 두께 약 500 Å 정도의 박막으로 형성한다. CdS박막은 2.46 eV의 에너지 밴드갭을 가지며, 이는 약 550 nm의 Wavelength에 해당한다. CdS박막은 n형 반도체이며, In, Ga, Al 등을 Doping함으로써 낮은 저항값을 얻을 수 있다. CBD 방법에 있어 증착되는 CdS막의 특성을 결정하는 가장 중요한 변수로는 증착온도, 용액의 pH, 막의 두께 등이다. CBD 법이란 용액 내에 적정량의 Cd⁺⁺와 S⁻이온을 만들고 용액의 온도를 조절하여 각 이온 농도의 곱이 용액의 용해도적보다 큰 경우에 CdS의 형태로 석출되는 성질을 이용한 것이다.

값싼 공정으로 우수한 특성의 박막을 얻을 수 있지만 CdS의 단점은 우선 Cd물질 자체가 독성인 점과 또한 여타 단위 박막과는 달리 습식 화학공정을 이용하는 점이다.

그 대안으로 물리적 박막공정으로 제조 가능한 In_xSe_y을 사용하기도 한다. 약 2 eV의 에너지밴드갭을 가진 In_xSe_y는 광특성이 양호하고, CIS와 비슷한 Defect Chalcopyrite 결정구조로 접합 특성이 개선될 수 있는 장점이 있다. 또한 In_xSe_y는 CIS와 동일 장치로 제조가 가능하기 때문에 경제적으로도 훨씬 유리하다. 하지만 효율은 아직 CdS 사용 시에 비해 낮다.

In_xSe_y 외에도 Buffer 층의 대체재료로 연구되고 있는 물질로는 Zn(O,S,OH)_x, In(OH)_xS_y, ZnIn_xSe_y, ZnSe 등이 있다[6].

2.1.5 Window 층

n형 반도체로서 CIS와 pn접합을 형성하는 Window 층은 태양전지 전면의 투명전극으로서의 기능을 하기 때문에 광투과율이 높아야 하고 전기전도성이 좋아야 한다.

현재 사용되고 있는 ZnO는 에너지밴드갭이 약 3.3 eV이고, 약 80%이상의 높은 광투과도를 가진다. 또한 Al이나 B 등으로 도핑하여 10⁻⁴ Ω·cm 이하의 낮은 저항값을 얻을 수 있다. B을 도핑하기도 하는데, 근적외선 영역의 광투과도가 증가하여 단락전류를 증가되는 효과가 있다.

ZnO박막은 RF Sputtering방법으로 ZnO Target을 사용하여 증착하는 방법과, Zn Metal을 이용한 Reactive Sputtering, 그리고 MOCVD(Metal

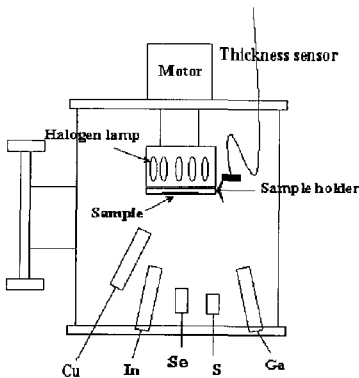


그림 3. CIS 제조용 Co-evaporator 개념도.

Organic Chemical Vapor Deposition) 방법 등이 현재 사용되고 있다.

전기광학적 특성이 뛰어난 ITO(Indium Tin Oxide) 박막을 ZnO 박막위에 증착한 이중 구조를 채택하기도 한다. 최근에는 CdS 박막위에 우선 도핑하지 않은 i형의 ZnO 박막을 증착한 다음, 그 위에 낮은 저항을 가진 n형의 ZnO 박막을 증착하여 태양전지의 효율을 개선하는 방법이 널리 이용되고 있다.

2.1.6 반사방지막, 그리드 전극

태양전지에 입사되는 태양광의 반사 손실을 줄이면 약 1% 정도의 태양전지 효율 향상이 가능하다. 반사방지막의 재질로는 보통 MgF_2 가 사용되는데, 물리적인 박막 제조법으로 E-beam Evaporation 이 가장 대표적이다.

그리드 전극은 태양전지 표면에서의 전류를 수집하기 위한 것으로 Al, 또는 Ni/Al 재질이 일반적이다. 그리드 면적은 태양광이 흡수되지 않기 때문에 그 면적만큼 효율의 손실요인이 된다. 따라서 정밀한 설계가 요망된다.

2.2 국외 CIGS 태양전지 개발 현황

그림4에 나타난 바와 같이 CIS계 태양전지는 미국의 Maine 대학과 Bell Labs에서 고효율 태양전지의 가능성이 처음으로 확인된 이후 1980년대 초 Boeing, ARCO(현재의 Siemens Solar Industries) 등의 연구진에 의해 본격적으로 개발이 추진되었다. 특히 미국 에너지부(DOE)의 자금지원을 받아 Boeing은 1980년에 이미 효율 10% 이상의 태양전지를 개발하였고, 여기서 얻은 기술을 토대로 유럽의 EUROCIS팀과 미국의 NREL 연구팀은 변환효율의 향상에 큰 진전을 보게 되었다. EUROCIS 팀은 1993년에 효율 15%를 달성하였고, 이후 NREL은 1994년에 15%를 돌파하고 1999년에는 18.8%를, 그리고 2004년에 최고 기록인 19.5%를 달성하였다. 또한 1998년에 미국의 Siemens Solar Industries에서 소규모이지만 모듈을 소개한 바 있고, 최근에는 최고 40 W 크기의 모듈 시제품을 시장에 내놓았다. 한편 독일의 Wurth Solar에서는 120 cm x 60 cm 크기의 모듈 시제품을 생산 중에 있으며 최고 효율 13% 평균 효율 11%를 보고하고 있다. 그러나 아직까지 모듈의 효율이 실험실 제작 태양전지의 효율에 비해

많이 낮아 대규모 상업화까지에는 앞으로 많은 기술개발이 필요한 실정이다.

일본의 경우 Matsushita 전기는 금속원소의 동시 진공증착에 의한 고품질 CIGS 박막 태양전지 모듈 개발을, 그리고 Showa Shell 석유회사는 Co-sputter+Selenization에 의한 CIGS 박막 태양전지 모듈 고속 제조 기술 개발을 주관하고 있다. 물성평가 등 기초연구는 동경농공대학, AIST 차세대 태양전지 실험실, 靑山學院대학, 동경공업대학 등이다. 그리고 CIS와 관련하여서는 저가화를 염두에 두고 폐기한 모듈의 재생 처리를 위한 기술개발도 함께 추진 계획이다.

최근에는 Shinko Electric Co. Ltd가 공정의 저가화 측면에서 전기도금 $CuInS_2$ 박막 태양전지 연구에 착수하여 2003년 효율 13% 달성을 목표로 하고 있다. 한편 Honda社에서는 공정이 아직 공개되지는 않았지만 모듈 제조에 성공하여 실증을 추진 중이라 발표한 바 있다. 한편 Wurth Solar에서는 30 MW급 생산라인은 건설하기 위해 600 억원 이상의 투자계획을 발표한 바 있다[9].

표1은 소면적 전지 및 대면적 모듈 개발에 선두를 달리고 있는 연구기관과 태양전지의 성능을 요약한 것이다. 모듈의 개발은 현재 미국의 Shell Solar Industries, EPV, Global Solar, ISET 독일의 ZSW/IPE, Wurth Solar 일본의 Showa Shell, Honda 등에서 추진 중에 있는데 그림5에서와 같이 다양한

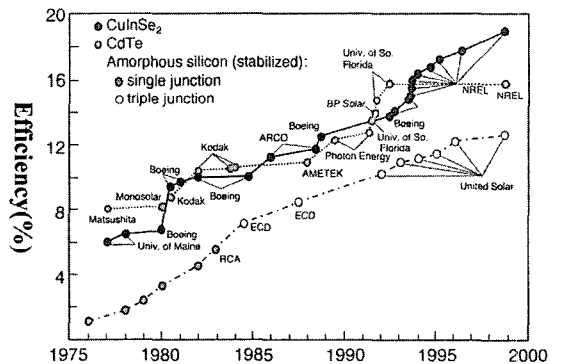


그림 4. 박막 태양전지의 변환효율 추이(미국NREL 데이터).

표 1. CIS계 박막 태양전지 및 모듈의 변환효율.

구분	재료	제조법	효율(%)	면적(cm ²)	개발기관
전지	Cu(In,Ga)Se ₂	동시진공증착	19.5	0.432	NREL(미)
	Cu(In,Ga)Se ₂	동시진공증착	17.6	0.38	EUROCIS(유럽)
	Cu(In,Ga)Se ₂	동시진공증착	18.5	0.96	Matsushita
	Cu(In,Ga)Se ₂	전착	15.4	0.418	NREL
모듈	Cu(In,Ga)Se ₂	진공증착	13.0	6,500	Wurth Solar(독)
	Cu(In,Ga)Se ₂	진공증착	10.1	7,085	Global Solar
	Cu(In,Ga)Se ₂	동시진공증착	13.9	90.6	IPE, ZSW(독)
	Cu(In,Ga)(S,Se) ₂	셀렌화	13.1	4,938	Shell Solar
	Cu(In,Ga)(S,Se) ₂	셀렌화	14.1	50.2	Showa Shell
	CuInSe ₂	전착	8.2	24.7	ISET(미)

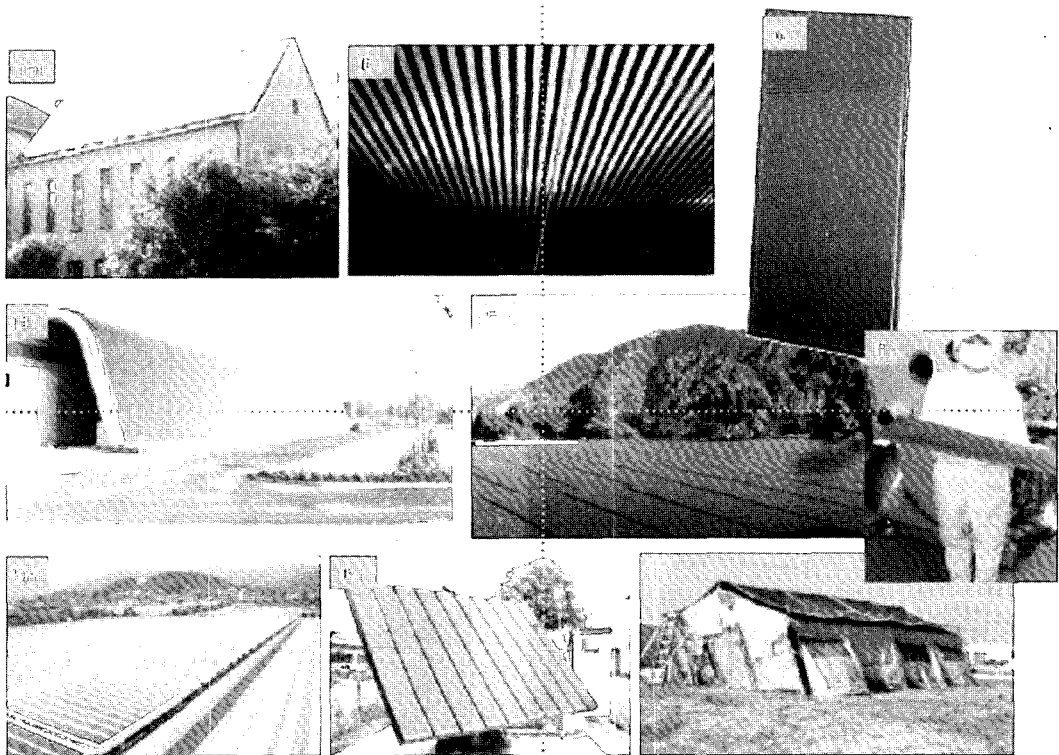


그림 5. (a)교회지붕에 설치된 13 kWp 모듈(Wurth Solar), (b)차양식 50% Semi-Transparency CIGS 모듈(Wurth Solar), (c)60X120 CIGS module(Wurth Solar), (d) 85kWp BIPV(Shell Solar), (e)245 kWp Rooftop CIGSS(Shell Solar), (f)스테인레스 스틸 기판 CIGS(Matsushita Electric), (g)70 kWp 시스템(HONDA), (h)30WX20 CIGS 모듈>Showa Shell), (i)천막용 CIGS 모듈(Global Solar).

용도로 모듈이 제조되고 있다.

2.3 국내 CIGS 태양전지 개발 현황 및 연구방향

이미 80년대부터 CIS 태양전지에 대한 연구가 시작되었으며 최근 한국에너지기술연구원과 한국과학기술원의 공동연구를 통하여 소면적 태양전지에서 효율 17.6%를 달성한 바 있다(그림11). 그리고 이 원화합물의 Co-evaporation에서는 효율 13.4%를 달성하였다. Co-sputter에 의한 Cu-In-Ga 합금 제조 및 셀렌화에 의한 CIGS 광흡수층 제조에 대한 공정 연구도 일부 추진된 바 있으나 아직 만족할 만한 효율을 얻지 못하고 있다.

실험실 단위에서 진행 중인 CIGS 태양전지 개발의 경우 단위박막 및 태양전지 소자를 구현하는 기술은 선진국의 60~70% 정도의 수준이라고 할 수 있다. 하지만 대면적 CIGS 태양전지 제조기술은 시도된 바가 거의 없는 실정이다. CIGS 태양전지의 상용화를 위해서는 지금 현재 소면적 태양전지 제조기술을 바탕으로 한 Scale-up이 매우 필요하다. 16~20 cm²의 미니 모듈 개발을 통하여 광흡수층 및 단위박막의 균일도 개선, 패터닝을 비롯한 모듈화 기술 등을 개발하고 축적된 기술을 통하여 100 cm²(10x10) 및 1200 cm²(30x40) 모듈의 개발이 진행되어야 한다. 또한 모듈화 기술이 개발된 상태에서는 기존의 유리기판을 이용한 대면적 모듈 뿐만 아니라 Roll-to-roll 방식의 대면적 모듈의 개발도 가능해지기 때문에 생산성의 측면에서 획기적인 전환을 가져올 수 있을 것으로 보인다.

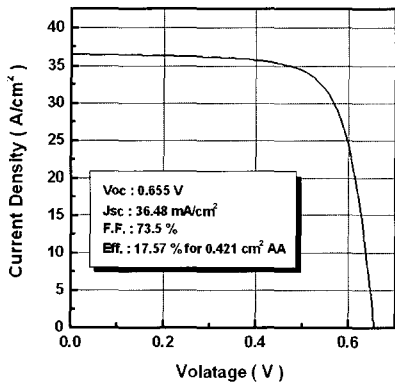


그림 6. CIGS 태양전지의 전류-전압 곡선.

3. CdTe 박막 태양전지

CdTe는 두 가지 측면에서 태양전지에 이상적인 물질로 간주되고 있다. 첫 번째는 에너지 갭이 1.45 eV인 직접천이형 반도체로 태양에너지의 스펙트럼을 고려했을 때 에너지 변환에 가장 적합하고[7] 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. CdTe 태양전지의 구조와 공정은 다음과 같다.

3.1 CdTe 박막 태양전지의 구조

앞서 언급한 바와 같이 CdTe 태양전지는 기본적으로 CdS(광투과층)와의 이종접합을 기본으로 하며 전면 투명전극과 배면전극으로 구성된다. CdTe 태양전지의 구조는 그림7에서 나타내고 있으며 각 단위박막의 특징 및 공정은 아래와 같다.

3.1.1 광흡수층

CdTe는 Sputtering, Evaporation, Electrodeposition 등 다양한 방법으로 제조가 가능하지만 일반적으로 CSS(Close-spaced Sublimation) 법이고 불리는 공정으로 광흡수층을 증착한다[8,9]. CSS법은 장치가 간단하고 유지가 간편하며, 특히 소오스와 기판과의 간격이 수 mm정도에 지나지 않아 빠른 증착속도로 대면적 태양전지를 제조하기 적합한 방식이다. CSS법 장치는 반응챔버, 할로겐 램프, Gas 분배 및 연결부, 진공펌프 및 기타 제어판으로 구성된다.

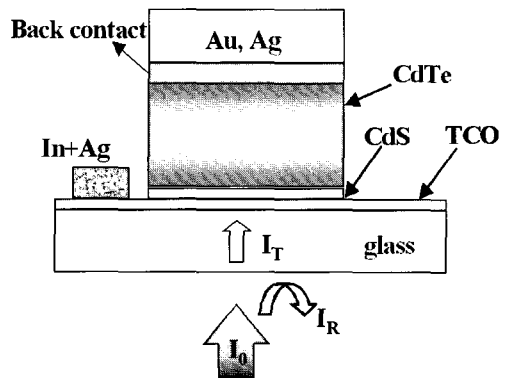


그림 7. CdTe 태양전지의 구조.

반응챔버의 상부와 하부에는 소오스와 기판의 온도 조절을 위하여 각각 할로젠 램프가 장착된다. CSS 반응챔버의 개략도를 그림8에 나타내었다.

3.1.2 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 Donor들로 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 Seep 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), 화학 기상증착법(Chemical Vapor Deposition), 열분해법(Spray Pyrolysis)과 CBD(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, CBD법

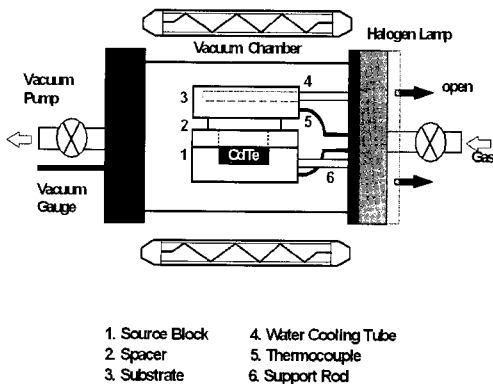


그림 8. CSS 반응챔버의 개략도.

은 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.

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.

3.1.3 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 전압 강하가 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 Over현상을 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. 이중에서 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 연

구팀들은 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 Cd²⁺의 이온의 크기는 비슷하여 CdTe 내에서 Cu⁺는 Cd²⁺ Site에 쉽게 Substitute가 된다. 따라서 Cu의 확산은 CdTe의 거의 전 영역에 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 보고되고 있다[10].

근래에는 Cu가 포함되지 않는 배면 전극 물질이 제안되고 있으며, 이런 예로 Ni₃P, Sb₂Te₃, 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.

3.2 국외 CdTe 태양전지 개발 현황

CdTe 전지의 효율은 현재 미국의 NREL의 16.4%가 세계 기록이며, NREL의 CdTe 그룹은 투명 전극으로 전도도와 투과도가 좋은 Cadmium Stannate(Cd₂SnO₄)와, Cd₂SnO₄와 CdS 층 사이에 Zinc Stannate(Zn₂SnO₄ 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 격자상수가 CdTe와 비슷한 Window Layer Material의 개발, 투명전극의 개발 등이 있다.

현재 국제적으로 이 분야를 선도하고 있는 연구 그룹을 표2와 표3에 정리하였다. 표1에 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

표 2. 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

표 3. 대면적 CdTe 태양전지의 효율.

Method(CdS/CdTe)	Area(cm ²)	Eff(%)	Organization	Year
CBD/E.Depo	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

경우 전력계통의 인프라가 갖춰져 있지 않은 제삼세계 국가들(남미, 인도, 아프리카 등지)을 대상으로 대규모 발전소 설립을 적극적으로 추진하고 있다.

3.3 국내 CdTe 태양전지 개발 현황 및 연구방향

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 근접승화법을 이용하여 14%의 효율을 얻었으며 Cu₂Te 전극을 개발하여 저항이 매우 낮으면서도 안정성이 뛰어나 전극을 개발하였다[11](그림4).

그러나 기존의 국내연구는 재료의 물성탐구 및 효율향상을 위한 공정연구에 치우쳐 있으며, 실제 상용화에 필요한 대면적화 방안에 대해서는 연구개발이

발이 수행되지 않고 있다. 또한 공정이 안정화 되어 있지 않기 때문에 태양전지의 에너지 변환효율이 불규칙한 실정이다.

4. 결론

고유가 및 환경문제의 대두로 최근 태양전지 시장은 급성장하고 있다. 특히 2004년도의 경우 세계 시장이 전년대비 60% 성장할 정도로 태양전지는 산업적으로 급부상하고 있다. 하지만 태양광 발전이 화석연료와 대등하게 경쟁하기 위해서는 현재보다 가격이 감소되어야 하며 가격 감소의 해결책은 태양전지의 저가 고효율화에 있다하고 할 수 있다. 현재 전체 태양전지 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지의 경우 기관이 차지하는 가격 비중이 매우 높아 가격 감소의 한계를 가지고 있다. 특히 최근에는 실리콘 태양전지의 생산량 증가로 실리콘 기관 가격이 상승하여 태양전지 가격이 오히려 상승하고 있다.

반면 박막태양전지의 경우 원재료 비중이 매우 낮기 때문에 저가형으로 제조가 가능하다. 따라서 기술 개발을 통해 대면적 모듈의 효율이 결정질 실리콘 수준으로 향상된다면 충분히 가격 경쟁력이 있을 것으로 보이며 차후에는 결정질 실리콘 태양전지의 시장을 대체할 것으로 예상된다.

특히 CIGS와 CdTe 박막 태양전지의 경우 물질 자체의 큰 장점으로 인해 효율의 측면에서나 대면적 모듈기술의 측면에서 박막 태양전지를 선도하고 있으며 현재 선진국을 중심으로 본격적인 상용화를 위한 노력을 진행 중이다. 따라서 이후 본격적으로 형성될 박막 태양전지 시장에서 국산 기술로 대등하게 경쟁하기 위해서는 지금의 실험실 수준의 연구를 바탕으로 하여 대면적 모듈화 기술개발이 진행되어야 한다.

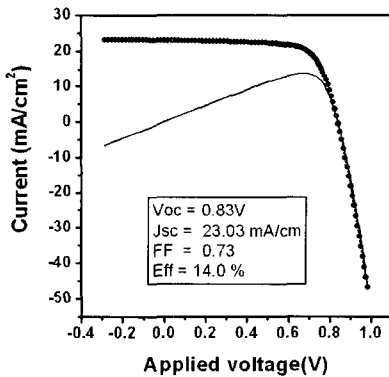


그림 9. CdTe 태양전지의 전류-전압 곡선.

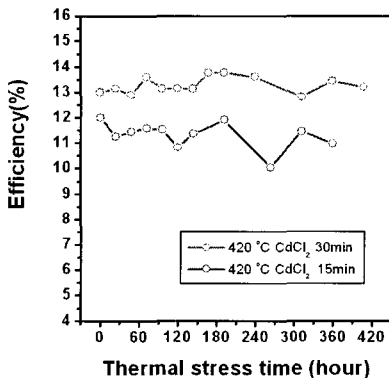


그림 10. 60 °C 질소분위기에서의 태양전지의 효율 변화.

참고문헌

[1] K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins, S. Asher, F. S. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero, W. Metzger, R. Noufi, J. Ward and A. Duda, Progress in Photovoltaic, 11, 2003, 225-23

[2] J. E. Granata, J. R. Sites, Prog. of the Second World Conf. on Photovoltaic Energy, Conversion(IEEE, New York, 1998)

[3] T. Nakada, D. Iga, H. Ohbo, A. Kunioka, pn. J. Appl. Phys, 36 (1997) 732-737.

[4] V. Probst, J. Rimmasch, M. Kaisdr, R. Schaffler, T. Walter, H. W. Schock, Proc. First World Conf. on Photovoltaic Energy, Conversion (IEEE, New York, 1994) 144.

[5] D. Rudmann, G. Bilger, M. Kaelin, F-J Haug, H. Zogg, A. N. Tiwari, Thin Solid Films 431-432 (2003), 37-40

[6] T. Nakada, M. Mizutani, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002), Part 2, No. 2b, 165-167.

[7] A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, "Fundamentals of Solar Cells", Academic Press, New York London (1983)

[8] T. Armoto, S. Kumazawa, H. Higuchi, T. Arita et. al., Jpn. J. Appl. Phys., 10 6304 (1997)

[9] C. Ferekides, J. Britt, Y. Ma, L. Kilian, Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conf. 389 (1993).

[10] Kevin D. Dobson, Iris Visoly-Fisher et. al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 62 295 (2000).

[11] Jae Ho Yun, Ki Hwan Kim, Doo Youl Lee, and Byung Tae Ahn, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, (2003) 203.

저자|약력



성명 : 윤재호

◆ 학력

- 1997년 한국과학기술원 재료공학과 공학사
- 1999년 한국과학기술원 재료공학과 공학석사
- 2004년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 2003년 - 현재

한국에너지기술연구원 태양광발전 연구단 선임연구원



성명 : 안병태

◆ 학력

- 1977년 서울대 재료공학과 공학사
- 1979년 한국과학기술원 재료공학과 공학석사
- 1989년 Stanford Univ. 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1992년 - 현재

한국과학기술원 신소재공학과 교수



성명 : 윤경훈

◆ 학력

- 1975년 한국과학기술원 재료공학과 공학사
- 1977년 한국과학기술원 요업공학과 공학석사
- 1986년 Limoges대(프) 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1980년 - 현재

한국에너지기술연구원 태양광발전 연구단 책임연구원