화합물 반도체 CIGS 박막태양전지

글 _ 김제하
한국전자통신연구원

태양광은 지구상에서 가장 풍부하고 고갈의 염려가 없는 에너지원이다. 태양으로부터 지표면에 공급되는 에너지는 청명한 날 1 제곱 미터당 1,000W의 전력 (AM1.5)이 지구상에 도달하고 있으며, 총량은 현재 인류가 사용하는 에너지 총량인 12 테라와트 (TW)의 약 10,000배에 해당하는 약 12만 TW이다. 이와 같이 태양광 에너지는 재생에너지 중에서도 가장 풍부한 자원으로서 미래에 지배적으로 사용될 수 있는 에너지원이 될 수 있음을 예상하고 있다. 빛을 전기에너지로 변환하는 것은 p-n 이종접합 반도체 소자를 이용한다. 이 반도체소자를 통하여 태양광을 직접 전기로 변환하기 때문에 전통적인 화석연료를 연소하는 방법과 달리 전혀 찌꺼기나 공해물질을 생성하지 않는다. 즉, 태양광발전은 화석연료와 달리 지구온난화 주범으로 알려진 탄소배출이 전혀 없는 청정한 에너지 기술이기도 하다. 이와 같이 태양광 발전은 그 양이 무한하게 많고 청정하기 때문에 차세대 인류의 에너지 문제를 해결해 줄 수 있는 가장 확실한 방안으로 인식되고 있어 지금 세계적으로 그 개발에 많은 노력을 기술이고 있다.

1. 태양전지 기술 개요

일반적으로 반도체 태양전지는 p-n 접합을 이루는 반도체 다이오드에 빛을 쪼이면 전자가 생성 되는 광기전효과 (photovoltaic effect)를 이용하여 태양광을 직접 전기로 변환하는 소자로 정의할 수 있다. 가장 기본적인 구성 요소로는 전면전극, 후면적극 그리고 이들 사이에 위치하는 광흡수체 등 3 부분으로 구별된다. 이 중 가장 중요한 소재는 광 전환효율의 대부분을 결정하는 광흡수체이며, 이 소재에 따라 다양한 종류의 태양전지 기술이 분류된다. 지금까지 개발된 태양전지 소재는, (1) 실리콘, (2) 화합물반도체, (3) 신소재, (4)유기물 등으로 구분할 수 있다. Fig. 1은 흡수 소재에 따른 태양전지 기술 분류에 대한 계통도를 나타내고 있다. 먼저 실리콘재료는 실리콘 웨이퍼와 실리콘 박막으로 구별할 수 있다. 지금, 가장 산업화가 앞서가고 있는 분야는 단연 결정질 실리콘(단결정 및 다결정) 태양전지이다. 태양광발전의 에너지 산업화에 가장 걸림돌이던 고가격의 주원인이었던 높은 실리콘 원재료 가격도 2008년 금융 위기 이후 약 1/10로 대폭 줄어들었다. 실리콘을 이용한 다른 형태는 비정질 실리콘을 박막형태로 유리판 혹은 금속기판(스텐레스 스틸)에 박막 태양전지을 형성하는 분야가 있다. 이 기술은 국내의 대표적 디스플레이 회사들이 상용화에 매진하

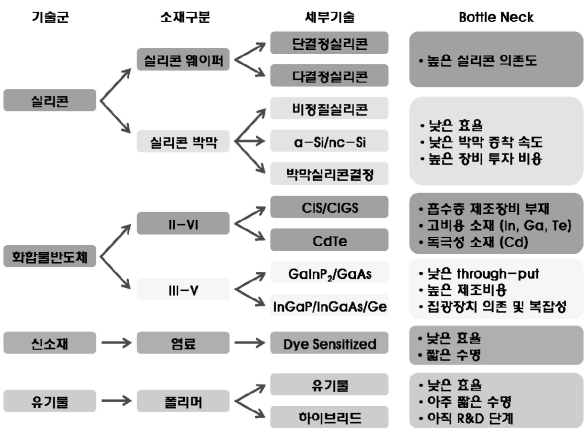

Fig. 1. 흡수층 소재에 따른 태양전지 분류 (참조: 2008 YOLE: Photovoltaic Report).

고 있다. 그러나 비정질 실리콘의 박막화라는 기 축적된 기술을 활용할 수 있는 장점이 있지만 단일접합 비정질 실리콘 태양전지의 효율 한계가 낮아 상용화 효율의 분수령으로 인식되고 있는 전환효율 10%를 달성하기 위해서는 탠덤구조를 활용하는 것이 일반적이다. 그리고 낮은 실리콘 박막의 증착 속도와 높은 장비투자 비용이 양산화의 걸림돌로 인식되고 있다. 한편, 세계 장치시장에서는 턴키 방식의 생산장비 시장이 이미 형성되어 있다 (예, AMAT, Orelikon, 주성ENG 등).

화합물 반도체는 CI(G)S (CuIn(Ga)Se_2)와 CdTe 계열과 III-V GaAs계열이 상용화에 가장 활발하다. 지금 가장 상용화에 성공한 소재는 CdTe 태양전지 (First Solar Inc.)이다. 특히, First Solar의 CdTe는 2009년 12월 현재 그리드패리티의 전제조건으로 인식되고 있는 $1.00/Wp가 이미 달성하였다고 알려져 있다. 한편, 향후 산업화에 성공할 수 있는 소재로 가장 주목을 받고 있는 것은 CIGS이다. 그러나 이 계열의 태양전지는 소재의 고비용/희소성 (In, Ga, Te)과 독극성(Cd)이 상용화의 제약요건이 되고 있다. CIGS는 아직도 신뢰할 만한 양산용 증착장비의 부재가 산업화를 억누르고 있다. 한편 GaAs계열은 수백배의 고집광을 이용한 초고효율 태양전지에 활용되고 있다. 선두 기업으로는 Spectrolab과 EMCORE (USA)가 있으며 40% 이상의 효율이 보고되고 있다. 그렇지만 태양광발전을 위해서는 셀 제작과 아울러 빛 집광시스템, 트랙킹, 냉각시스템 등의 주변장치에 대한 점도 아울러 고려되어야 한다.

다음으로 신기능 태양전지로 각광을 받고 있는 소재는 염료감응 태양전지이다. 염료를 광전변환소재로 활용하기 때문에 제조가 쉽고 채색 반투명 태양전지 셀 제작이 가능하여 창호적용과 같은 건물일체형 응용분야에 널리 활용성이 예고되고 있다. 단점으로는 낮은 효율과 결정질실리콘 및 화합물 반도체에 비하여 짧은 수명이 지적되고 있다. 이상의 태양전지들이 최고 20%의 효율에 제한되고 있는 반면 30%를 상회하는 차차세대의 기술로 유기태양전지가 집중 연구되고 있다. 아직은 낮은 효율, 아주 짧은 수명이지만 멀지 않은 미래에 초고효율, 초저가 태양전지가 이 기술을 기반으로 실현될 것으로 기대되고 있다.

산업적으로는 태양전지의 에너지 전환 효율과 더불어 제조비용에 의하여 3개 세대로 구별하고 있다. 즉, 1 세대는 결정형(다결정 및 단결정) 실리콘 태양전지로서 현재 가장 성숙된 기술 분야이고, 2 세대는 박막형 반도체 (a-Si, CdTe, CIGS) 태양전지로서 에너지 전환효율은 다소 떨어지지만 제조 비용이 훨씬 저렴할 것으로 예상되고 있는 차세대 기술이며, 3 세대는 식물의 광합성과 같은 기존의 반도체와는 메커니즘을 이용하여 광.전 변환을 만들어 내는 유기물 등 신재료 및 신개념 태양전지 차차세대 기술이다. 일반적으로 1 세대 결정형 Si 태양전지 모듈은 약 15~18%의 모듈 효율을 내고 있는 반면, 2 세대 박막형 화합물 반도체 7~12% 및 3 세대 태양전지는

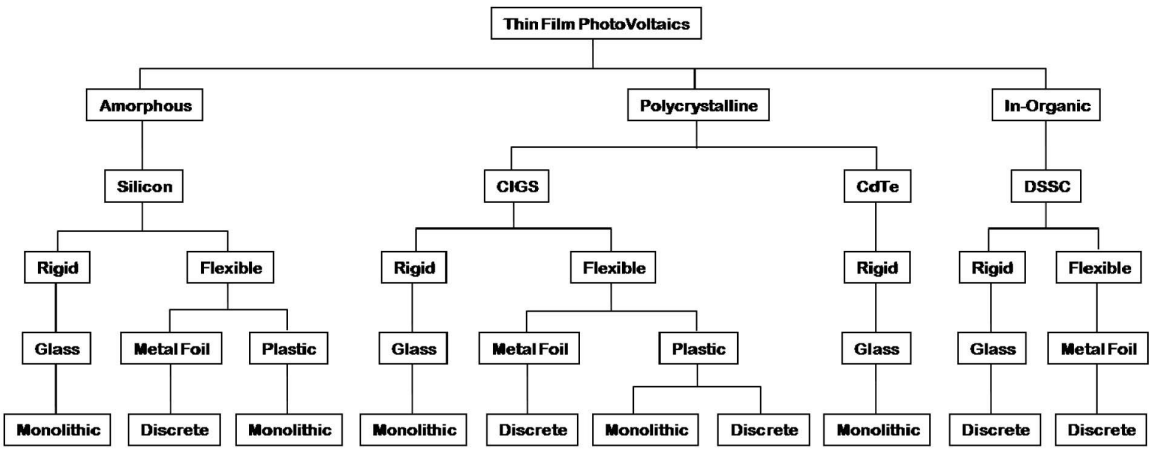

Fig. 2. 박막 태양전지 기술 분류.

5% 에너지 전환효율 대를 기록하고 있다.

태양광 발전이 본격적인 에너지 산업으로 성장되지 못하고 있는 데는 태양전지 셀 제조 비용이 너무 비싸다는 점이 끊임없이 지적되고 있다. 이와 같이 저가화에 대한 필요성 때문에 유리판이나 유연금속 코일을 이용하는 박막태양전지 제조기술과 고효율인 CIGS 등의 소재가 주목을 받고 있는 것이다. 지금 개발되고 있는 박막 태양전지도 흡수 소재 및 기판 등의 종류와 형태에 따라 다양한 기술로 분류되고 있다 (Fig. 2). 먼저 주어진 박막 태양전지 소재를 사용 기판 별로 (가)딱딱한 소재 (예, 유리)와 (나) 유연소재 (금속코일 혹은 플라스틱)로 구별하였다. 저렴한 제조 공정상 박막형이 결정형과 차별화할 수 있는 것은 모노리식 집적화의 가능성이다. 즉, 생산공정을 마치면서 모듈까지 한꺼번에 제작이 되는 모노리식 집적화는 주로 유리기판에서만 가능하다. 유연기판을 사용할 경우 모노리식 집적화를 위한 레이저 스크라이빙과 같은 공정이 용이하지 않기 때문에 결정질 실리콘 태양전지처럼 여러 개의 셀을 한 모듈로 만들기 이해서는 어레이로 집적하는 (discrete) 방식이 사용되고 있다. 그러나 일부 기업에서 유연기판에서도 모노리식 집적화하는 기술을 상용화하고 있어 (Ascent Solar Technology, USA) 조만간 모노리식 집적 유연태양전지 모듈도 출현할 것으로 예상된다.

박막 태양전지는 무엇보다도 고효율성과 박막공정의 저가 가능성 때문에 상용화에 많은 노력을 전세계적으로 기울이고 있다. 예상과 같이 2성분계인 CdTe 태양전지는 저렴하고 신뢰성 높은 VTD(vapor transport deposition) 증착방식이 상용화에 성공함으로써 태양전지 셀 산업을 선도하고 있다. 한편 여전히 신뢰할 만한 대면적 박막증착기술이 미 개발인 CIGS는 상용화가 늦어지고 있다. Fig. 3은 CIGS와 CdTe 박막태양전지의 양산공정 흐름도이다. 이 양산 공정은 이미 널리 알려져 있으며, 그 나름의 최적화된 장비 및 공정순서를 조합할 수 있다. 다만 한가지 CIGS 증착과 CdTe의 대면적(600 x 1200 cm^2 이상) 증착기술은 각 기업의 자체 개발에 의존할 뿐이다. 이 점이 산업화의 성패를 좌우하고 있다.

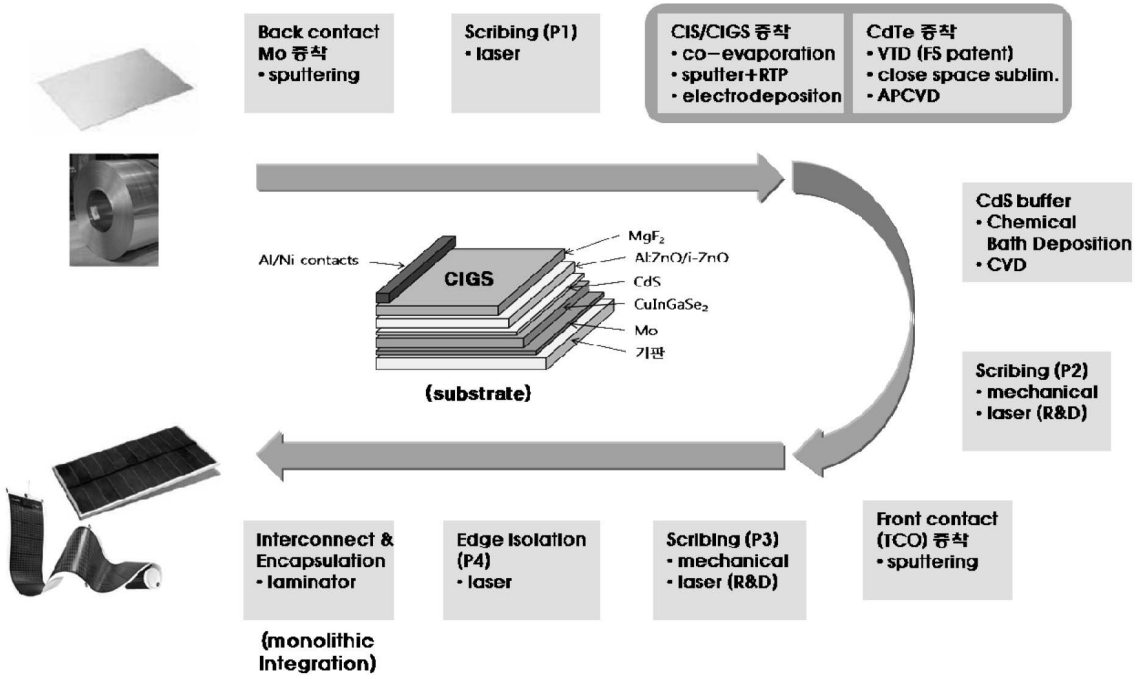

Fig. 3. 화합물 박막태양전지 제조 공정 순서도 (참조: 2008 YOLE: Photovoltaic Report).

2. CI(G)S 소재

CIS($CuInSe_2$) 화합물 반도체는 기본적으로 Cu, In 및 Se으로 이루어진 칼코제나이드 (chalcopyrite)구조를 갖는다 (Fig. 4). 직접천이형 반도체(Eg ~ 1.2 eV) 구조로서 에너지 전환효율이 높다. 구조적으로 In원자를 대치하는 Ga 도핑에 의한 밴드갭 조절은 태양전지 효율향상에 직접적인 영향을 주고 있다 (CIGS = Cu(InGa) Se_2). 이외 Al, Ag, S 등의 원소를 추가함으로서 밴드갭에너지를 1.0~2.7 eV로 광법위하게 변형을 줄 수 있기 때문에 이를 이용한 태양전지 효율향상을 시도하는 밴드갭 엔지니어링도 가능하다. CIS 소재의 가장 큰 장점은 높은 광흡수율 이다 ($\alpha > 10^5\ cm^{-1}$). 이는 Eg = 1.0 eV영역에서 결정질 실리콘 대비 약 100배 이상의 큰 광흡수 특성을 보이고 있다. 따라서 보통 CIGS 태양전지에서는 결정질 실리콘 태양전지에서 채택하는 광반사를 위한 텍스쳐링 (texturing) 구조를 사용하지 않아도 충분한 광흡수가 이루어 진다. 또한, 환경 안정성과 방사선에 대한 저항력이 크기 때문에 우주용에도 적합한 것으로 알려져 있다.

그러나 모든 $CuInSe_2$가 고효율의 태양전지가 되는 것은 아니다. Fig. 5는 $CuInSe_2$의 2성분 위상표 (In_2Se_3와 Cu_2Se)를 보이고 있다. 이 위상표에서 보듯이 조성과 온도 조건에 따라 $CuInSe_2$는 모두 4 종류의 결정상 (α, β, γ, δ)이 존재하며, 가장 효율이 높은 특성은 α-$CuInSe_2$로 알려져 있다. 이 α-위상은 조성의 폭에 대한 허용범위가 작은 한편 온도 특성상 광범위한 영역이 가능함을 알 수 있다. 즉, CI(G)S를 형성하는데 있어서 매우 엄밀한 조성형성이 중요하며, 또한 온도의 역할이 중요함을 알 수 있다. 이와 같이 Cu, In, Ga, Se 등 4성분의 CIGS 박막 제조는 다양한 최적 제조법이 있을 수 있다. 이런 이유 때문에 600°C 이상의 고온에서 제조하는 유리기판 및 금속기판 CIGS가 있는 반면, 400°C 이하의 공정에서도 제조가 가능한 플라스틱(polyimide, PI) 기판을 이용한 CI(G)S 태양전지가 있다. (Ascent Solar Technology, US; Solarion, Germany).

이와 같이 4 성분계 화합물 반도체인 CIGS ($CuInGaSe_2$) 태양전지 셀의 실험실 최고 효율은 2009년 3월, 현재 19.9%로서 박막형 태양전지 중 가장 높은 효율을 보이고 있다[1]. 이는 2 성분계 화합물 반도체인 CdTe 박막 태양전지의 16% 셀 효율을 보다 월등히 높은 결과이다. 한편, 결정질 실리콘 소재는 단결정과 다결정 셀에서 각각 25% 및 20.3%의 화합물 반도체에 비하여 상대적으로 높은 셀 전환효율을 보이고 있다. 그러나 CIGS가 다결정(폴리) 실리콘 태양전지의 20.3%와 대등한 수준을 보이는 것은 주목할 만 하다.

현재, CIGS 태양전지의 가장 중요하면서도 해결이 쉽지 않은 이슈는 다음 4가지로 요약할 수 있다. 첫째 4 성분 제어 (Cu, Ga, In, Se(S)), 둘째 CIGS의 조성제어

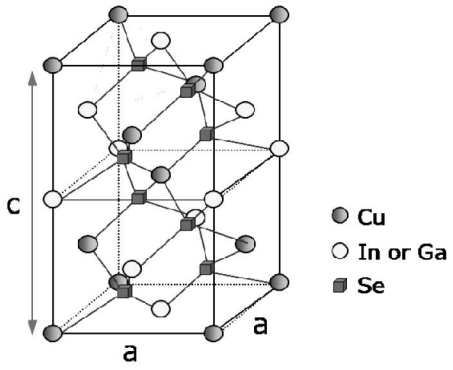

Fig. 4. CIS 반도체의 칼코제나이드 구조.

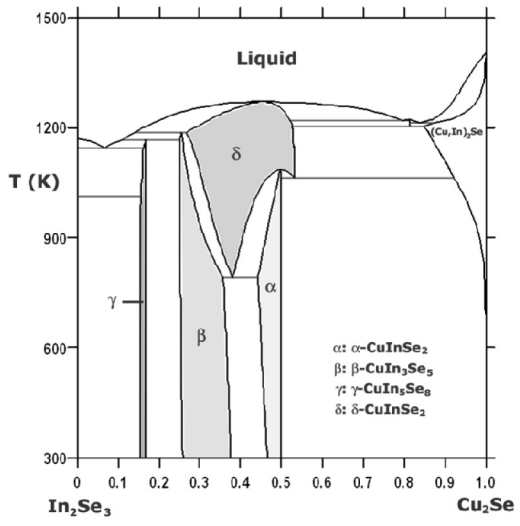

Fig. 5. 2성분 결정 위상표 (binary phase diagram).

(Cu/(Ga+In) < 1.0, Ga/(Ga+In) ~ 0.3), 셋째 바른 결정성장 (α위상) 확보, 넷째 결정성(큰결정립, 대면적 균일성, 무결점 등)이다. 이상과 같은 고품위 CI(G)S 박막 성장에 가장 필요한 3 요소는 (1) 조성의 균일성, (2)열공정 균일성 및 (3) 셀렌 공급의 균일성을 확보하는 것이다. 지금도 CIGS 박막을 얼마나 효율적으로 제조할 수 있는가 하는 것은 연구개발의 가장 핵심이 되고 있으며, CIGS 회사들은 각자의 CIGS 고유 증착기술로 산업화에 나서고 있는 중이다.

3. CIGS 태양전지의 구성 및 공정 방법

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 CIGS 태양전지의 구조도와 각 구성 박막층의 명칭과 공정방법을 보이고 있다. 가장 일반적인 태양전지 구성으로는 소다라임 유리기판 위에 Mo 후면전극, p-형 반도체 CIGS 광흡수층, n-형 반도체 CdS 버퍼층, 진성(intrinsic)-ZnO/Al:ZnO 투명창층, MgF_2 무반사층과 Al/Ni 그리드 전극층을 형성하여 제작한다.

이 중 가장 중요한 요소는 빛을 흡수하는 CI(G)S 광흡

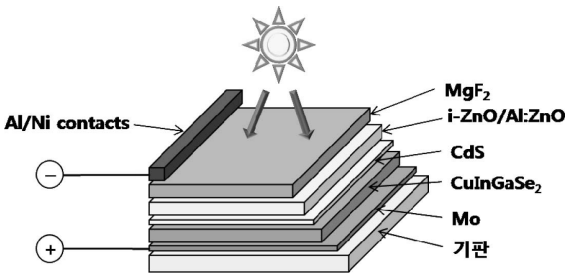

Fig. 6. CIGS 태양전지 구조도.

층 구분	소재 구분	공정 기술
전면금속	Al / Ni	전자선 증착
(무반사막)	MgF_2	전자선 증착
투명창	n-Al:ZnO / i-ZnO	RF 스퍼터링 (MOCVD)
버퍼	CdS	CBD (화학적용액증착)
광흡수층	$CuInGaSe_2$ (CIGS)	동시증발법, 스퍼터링+셀렌화, 황화
후면금속	Mo	DC 스퍼터링
박막기판	유리판, 스텐레스 스틸 foil, 폴리머	기판 세척

Fig. 7. CIGS 태양전지의 박막층 명칭 및 공정방법.

수층 소재이며 가장 바람직한 박막 조성은 Ga/(In+Ga) = 0.3, Cu/(In+Ga) = 0.8 ~ 1.0으로 알려져 있다. 특히, Ga이 In의 위치를 치환하여 첨가되면 CIGS의 밴드갭이 향상 되어, 소자의 에너지 변환효율도 같이 상승하는 모습을 보이게 된다. 그러나 그 비율이 Ga/(In+Ga) > 0.30으로 도핑이 증가 되면 밴드갭은 향상될 지라도 효율이 오히려 감소하게 된다. CIGS의 박막두께는 통상 약 2.0~3.0 μm이다.

CdS 버퍼층은 표면이 고르지 못한 다결정(polycrystalline) CIGS 박막의 표면에 고루 증착함으로써 (conformal coverage) 최종 태양전지 소자상 결함(damage)을 노출시키지 않으면서도 CIGS에 입사하는 빛의 차단을 최대한 억제하도록 50 nm 두께의 얇은 박막을 사용한다. 이 해결방안으로 CdS 소재를 화학용액증착 (chemical bath deposition; CBD)으로 성막하는 것이 황금율로 알려져 있다. CdS는 CIGS와 투명창층인 ZnO의 큰 밴드갭 차이를 완충(buffer)하는 역할도 한다. 비록 50 nm의 CdS를 사용하고 있지만 카드뮴의 독성 때문에 Zn(O, OH)S, In_2S_3 등 대체 소재 연구가 진행되고 있다. 특히, ZnS를 사용할 경우 UV영역의 양자효율이 CdS보다 높아 약 8%의 전환효율 추가 향상이 기대되지만 [2] 장파장 영역에서 양자효율이 감소하는 현상을 보이고 있다. 또한, 습식 CBD 제조 방법은 다른 모든 박막성장 기술인 진공방식의 인라인 일괄공정에 장애가 되고 있다. 이를 극복하기 위하여 버퍼 소재를 진공 공정 혹은 진공 공정과 함께 사용할 수 있는 박막 성장법(ALD; atomic layer deposition)의 개발연구가 활발하다.

기판으로는 소다라임 유리판(sodalime glass), 스텐레스 스틸 코일 (stainless steel coil), 폴리머 (polyimide; PI) 등 다양한 소재가 사용된다. 일반적으로 소다라임 유리기판이 사용하는 것은 유리에 함유된 나트륨(Na) 성분이 고온공정 중 Mo층을 통과하여 CIGS 결정립을 크게 하여 전환효율이 향상하기 때문이라고 알려져 있다. 반면에, 유리기판이 아닌 금속 유연기판 소재의 경우 일부러 Na층을 추가하여 CIGS 결정성 향상을 하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

후면전극으로 몰리브데늄 (Mo) 전극은 CIGS 태양전

지의 황금율 중의 하나이다. Mo는 다른 어떤 소재보다 유리기판과의 열팽창계수가 비슷하며, 부착성과 전기 전도도를 동시에 만족 시켜주는 소재로 알려져 있다. 박막 성장을 위해서는 진공증착 DC 스퍼터링을 가장 많이 사용하고 있다. 한편 전면전극으로 i-ZnO/Al:ZnO가 투명창 (TCO; transparent conducting oxide)에 사용된다. 박막태양전지의 경우 모노리식 집적화를 하게 되는 데 있어서 투명창은 1 μm 이상으로 두껍게 성장하기 때문에 전기 전도도와 빛의 투과도를 동시에 최적화 하는 것이 매우 중요하다. 그리고 ZnO의 고유물성인 친수성은 CIGS 태양전지 모듈의 수명에도 직접적인 영향을 준다. 한편 우주공간용 태양전지 모듈에는 TCO 소재로 ITO를 사용하기도 한다

4. CIGS 박막 성장기술

CIGS 태양전지가 고효율 및 대면적 가능성의 장점에도 불구하고 산업화가 부진한 이유는 산업적으로 믿을만한 CIGS 제조공정이 확립되지 못하였기 때문이다. 4원소 화합물인 CIGS는 다양한 제조 방법이 활용되고 있다. 그 종류로는 진공증착, 나노프린팅, 전기증착, CBD 등이 있다. 이 중 가장 많이 활용되고 있는 진공증착 방법으로는 증발법 (evaporation)과 2 단계공정 (two-step process; precursor-reaction)법 두 가지가 대표적인 공정으로 알려져 있다. Fig. 8은 지금 사용되고 있는 CIGS 흡수층 제조공정 기술의 분류표 이다.

가장 기본적인 증발법은 단위 원소인 구리(Cu), 인듐(In), 갈륨(Ga) 및 셀레늄(Se)을 열증발원 (thermal evaporator 혹은 Knudsen cell)을 이용하여 동시에 증발시켜 (co-evaporation) 고온 기판에 박막을 형성하는 방법이다. 이는 1982년 Boeing(미국)에서 개발된 방법으로, 각각의 증발원을 독립적으로 설치하여 사용하기 때문에 원소의 조성 제어가 용이하고, 특히 도핑 소재인 Ga의 최적 조성비율 Ga/(In+Ga)=0.3을 제어하는데 편리하다. 그러나 기본적으로 증발원이 점원(point source)이기 때문에 수천 제곱 센티미터의 대면적 기판에 박막을 형성하기에는

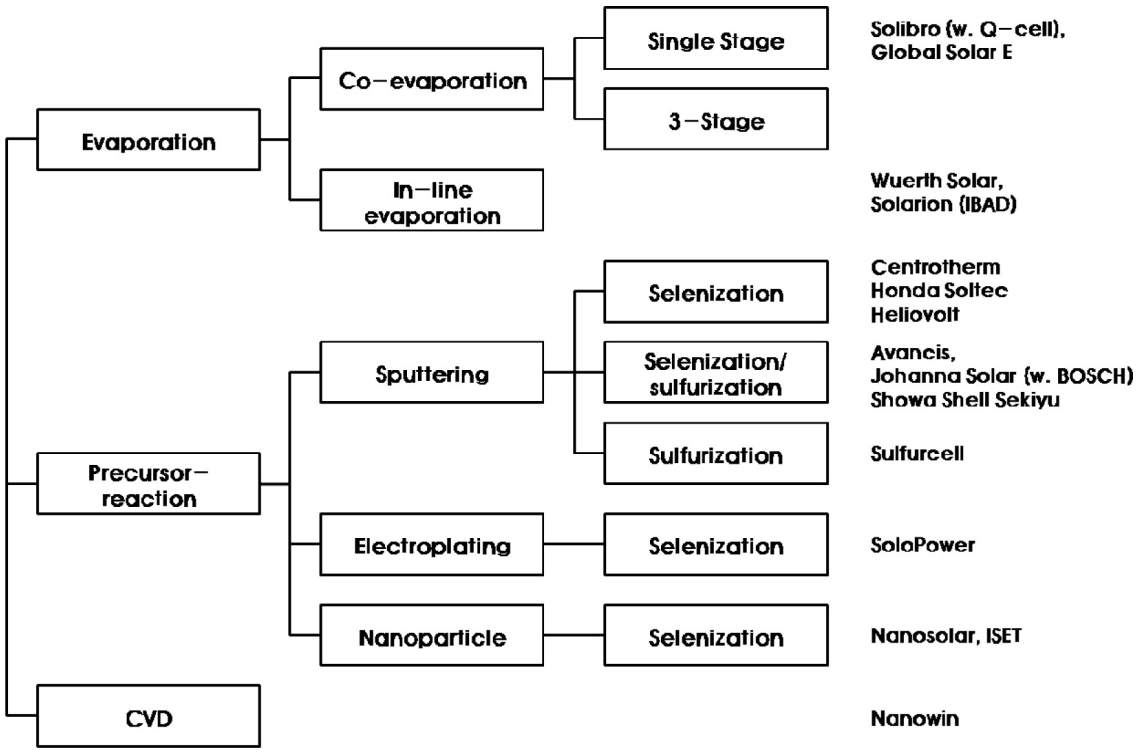

Fig. 8. CIGS 박막 제조공정 분류.

불리한 점이 많다. 따라서 대면적 박막 제작을 위해서는 선형 증발원 (line evaporation source)의 개발이 시급한 실정이다. 대면적 박막의 대량 생산을 위해서는 기판이 선형 증발원 위에서 인라인(in-line)으로 수평 이동하면서 박막이 제작되어야 하는데, 이 경우 조성 제어가 정지 상태에서 보다 매우 어려우며, 이는 효율 향상에 가장 큰 장애요인이 되고 있다. Fig. 9은 동시 증발법과 인라인법의 비교를 보이고 있다. 산업화에서는 대면적화에 적합한 인라인 증발법이 사용되고 있다. 이제까지 이 방법의 약점으로 많이 지적되었던 것은 점원이기 때문에 소재 사용률이 저조할 뿐만 아니라 점원의 구조적 특성으로 인하여 상향식으로만 사용될 수 있다는 제약이었다. 그러나 이러한 단점도 선형증발원 (최대 1.0 m 폭; Veeco Co., USA)의 개발로 많이 극복되고 있다.

고효율 태양전지 결정상 (α-CIGS)을 만드는데 있어서 기판의 온도(보통 550°C)는 매우 중요한 변수이다. 최고 효율의 방법은 박막 증착과 기판의 온도를 3단계로 변화시켜주며 CIGS 결정상 (phase)을 최적화하는 3 단계 공정법(three-stage process)이다. 이는 1996년 미국 에너지

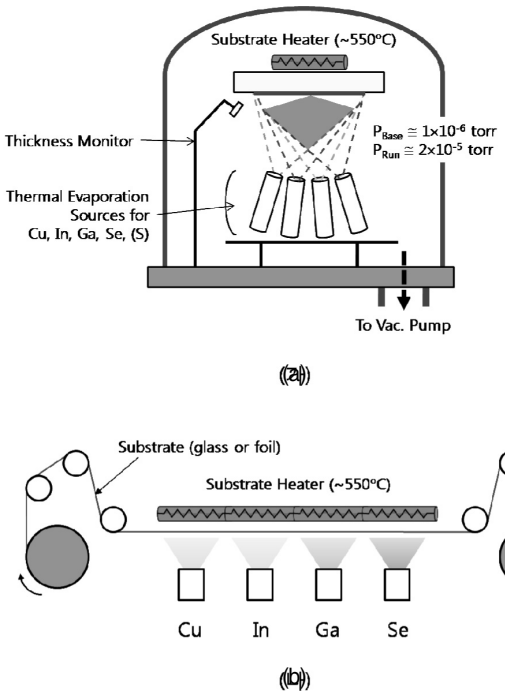

Fig. 9. CIGS 박막형성기술; (a) 동시증발법, (b)인라인증발법.

연구소(NREL)에서 개발되었으며 최고 효율인 19.9%를 달성한 방법이다. 국내외적으로 최고효율은 이 3 단계 공정법을 널리 활용하고 있다.

2단계 공정(two-step process) 방법은 CIG 혹은 CIGS 전구체 (precursor) 제작과 셀렌화 (selenization) 혹은 황화(sulfurization)에 의한 제조 공정이다 (Fig. 10). 먼저 전구체 제작에 있어서 스퍼터링에 의한 진공 증착과 전기증착 (electro-deposition)에 의한 비 진공법이 있다. 다음으로 전구체의 CIGS 화합물 반도체 조성을 완성하기 위해서 고온 열처리 과정을 거치게 된다. 즉, 증발법이 CIGS 증착과 동일한 챔버에서 셀렌화가 이루어지는 것과 달리 2단계 공정(two-step process)은 독립된 다른 챔버에서 셀렌화가 이루진다는 점이 공정상 차이점이다. 첫 단계에서는 구리(Cu), 인듐(In), 갈륨(Ga) 혹은 셀레늄(Se)이 스퍼터링 증착 (혹은 전기도금)에 의하여 순차적으로 기판 위에 전구체 박막으로 형성된다. 다음 단계인 열처리 과정이 이 2단계 공정의 핵심인데 CIGS의 조성을 맞추기 위하여 약 550°C의 고온전기로 (furnace)에서 급속 열처리 (RTP: rapid thermal process)하게 된다. 이 때 고온 전기로 내부는 하이드라이드 가스 (H_2Se, H_2S) 1 atm 분위기에서 400-600°C로 유지되거나 단순히 고온처리 되는 등 공정 노하우는 업체마다 다르다. 사용 소재에 따라 셀렌화 (selenization) 혹은 황화 (sulfurization)라 불리며 때로는 두 가지가 동시에 사용되기도 한다. 이 방법은 증발법에 비하여 박막의 균일성이 좋고 소재의 활용도도 높일 수 있기 때문에 제작공정의 저가화가 가능하다고 알려져 있다. 스퍼터링의 경우 평판형 타겟과 실린더형 타겟은 각각 30% 및 70% 등의 소재 활용율을 보고하고 있다. 이 방식의 양산화 기술은 1980년대 ARCO Solar (미국)에서 개발되었으며, 일본에 기술이 도입되어 Showa Shell에서 대면적 CIGS 모듈 효율 13.4%

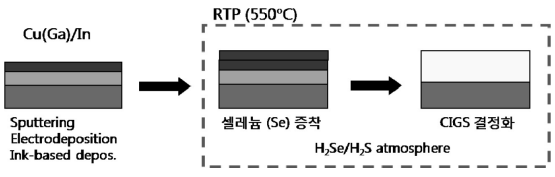

Fig. 10. two-step process (precursor-reaction) 구도.

를 얻은 바 있다. 국내에서도 삼성전자에서 최근 이 스퍼터증착 CIGS 전구체-반응 (precursor-reaction) 법을 이용하여 20×20 cm^2의 모듈에서 12% 이상의 높은 효율을 달성한 바 있다.

다른 방법으로 CIGS 전기도금법 (electrodeposition; SoloPower Co., USA), 나노입자를 이용한 잉크프린팅법 (ink-printing; ISET, nanosolar, USA)과, 전기화학 증착법(electro-chemical deposition; IBM, USA) 등이 새로이 연구되고 있다. 이 기술의 가장 큰 장점인 90% 이상의 소재 활용률과 제조 공정의 단순성이며, 저가 CIGS 생산을 위한 대안 기술로 끊임없는 관심을 모으고 있다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 CIGS 증착기술은 곧 각 회사의 존립기술기반이 되고 있다. 증발법과 2단계 성장법인 전구체-반응법이 대세가 되고있으며, 각 기술은 서로 장단점이 있어서 아직도 어느 기술이 배타적 우위를 갖게 될 것이라는 것을 판단하기는 어렵다. 또한 신 기술로서 CVD 방법도 상업화가 시도되고 있다는 점을 지적하고 싶다.

5. CIGS 태양전지 산업화 동향

CIGS는 가장 효율이 높은 화합물 반도체 박막 태양전지 소재이다. 잠재 모듈 효율은 셀효율(19.9%)의 80% 수준인 16%까지 기술개발이 될 것으로 예상되며, 그렇게 되면 셀 최고효율이 16%인 CdTe 박막태양전지와 20.3%인 다결정 실리콘 태양전지 시장을 압도할 것으로 전망한다. 이러한 기대감 때문에 CIGS에 대한 산업화가 많은 관심을 보이고 있는 것이다. 2009년 현재 수준으로 CIGS 태양전지의 구조 및 제조 방법 등이 이미 성숙 안정화 돼 가고 있기 때문에 전 세계적으로 CIGS 기업이 속출하고 있다. 이런 상용화의 핵심은 CIGS 박막의 제조방법에 의하여 구분되고 있다. Table 1은 2008년 현재 CIGS 기업들과 각 기업의 핵심 CIGS 제조기술을 표기하고 있다.

Showa Shell (일본)은 3,459 cm^2의 대면적 CIGS 모듈에서 13.4% (스퍼터링 및 셀렌화)를 기록하고 있으며, 한편 ZnS/CIGS에서 15.7% (셀면적 30 x 30 cm^2)를 2009 EUPVSEC에서 보고하였다. 이 셀에서 MOCVD에 의한 ZnO:B 투명창층이 이용되었다[3]. Würth (독일)은 7,230 cm^2 크기의 대면적 모듈에서 12% (인라인 증발법)의 모듈 효율을 보고하였다. CIGS 제조장비를 제공하는 Centrotherm (독일)은 2007년 이후 CIGS 턴키솔루션 (turn-key solution)을 사업화하고 있다. 핵심기술은 CIGS 박막 성장으로 스퍼터링을 이용하고 있으며 RTP(rapid thermal process)를 이용하여 셀렌화를 한다. 인라인 공정에서 열처리에 걸리는 시간은 60초라고 한다. 이 회사의 CIGS 기술은 30×30 cm^2 유리기판에서 2009년 09월 현재, 10.3%의 모듈을 제작하고 있다. Heliovolt (미국)는 서로 다른 두 개의 전구체를 접합하여 고속 셀렌화를 수행하는 'FASST(Field Assisted Simultaneous Synthesis and Transfer)' 공정을 특허기술로 차별화 하고 있다. 이와 같이 전구체+셀렌화 공정을 기반으로 하는 기술의 핵심은 '신속한 셀렌화' 이다.

유연기판을 이용한 CIGS 모듈 생산도 약진을 하고 있다. 특히, 건물일체형 (BIPV; building integrated photovoltaics)에 적합한 미래기술로서 유연기판 태양전지의 활용도는 막대할 것으로 예상된다. 이 분야의 선도 기업은 Global Solar Energy (GSE; 미국)이다. GSE는 스텐레스 스틸 포일 기판 위에 인라인 증발법과 롤투롤 공정을 이용하여 CIGS 셀 및 모듈 생산하고 있다. 현재까지 유일한 CIGS 모듈 양산업체이다. Solarion AG (독일)는 폴리머기판 (PI)위에 CIGS셀을 제작한다. 핵심기술은 IBAD (ion-beam assisted deposition; patented)을 이용한 Se 증착이며, 이 방식의 특징은 이온화된 Se을 이용하여 셀렌화를 수행하기 때문에 400°C 저온에서도 고품질의 CIGS 박막을 제조할 수 있다는 것이다. 셀 효율은 14% 라고 주장한다. 한편 Ascent Solar (미국)은 PI를 기판을 이용하는 것은 Solarion AG와 동일하지만 유연기판임에도 불구하고 모노리식 집적화를 하는 점이 차별화되고 있다. 이와는 달리 유연 스텐레스 스틸 포일 기판을 사용하고 있지만 SoloPower(미국)는 CIGS 증착방법으로 비진공 전기도금법을 이용하는 유일한 기업이다. 2008년 약 1.0 m^2, 9.5%의 효율의 모듈을 제작하여 NREL의 공인을 받은 바 있다.

Table 1. 주요 CIGS 기업과 핵심기술 (출처 Greentechmedia 2008)

Company	Country	Absorber	Process	Substrate	Efficiency
Ascent Solar	US	CIGS	roll-to-roll & monolithic integration	polyimide	9.5
Daystar Technologies	US	CIGS	sputtering, one-step deposition	glass	10
Global Solar	US	CIGS	co-evaporation, roll-to-roll	STS	10
Heliovolt	US	CIGS	FASST™	glass	10
Miasole	US	CIGS	sputtering, PVD & roll-to-roll	metal (flexible)	9.5
Nanosolar	US	CIGS	printing, rapid thermal process	metal (flexible)	9
SoloPower	US	CIGS	electroplating, roll-to-roll	STS	7.7
Solyndra	US	CIGS	sputtering	glass	
Ampulse	US	CIS		metal (flexible)	
InterPhases Research	US	CIS	electroplating, roll-to-roll	metal (flexible)	
ISET	US	CIS	non-vacuum process	glass	
Nanowin	Taiwan	CIGS	CVD	glass	
Flisom	Switzerland	CIGS	roll-to-roll	plastic (flexible)	
Scheuten Solar	Netherlands	CIS	bulk process, roll-to-roll	glass beads on metal	4.4
Honda Soltec	Japan	CIS	sputtering	glass	
Showa Shell Sekiyu	Japan	CIS	sputter & selenization	glass	9.48
Shurjo Energy	India	CIGS		glass	
Solarion GmbH	Germany	CIGS	IBAD, co-evaporation, roll-to-roll	polyimide	10
Solibro GmbH	Germany	CIGS	sputtering, PVD	glass	10.5
Johanna Solar (Bosch)	Germany	CIGSSe	sputtering	glass	
Avancis	Germany	CIS	sputter & selenization	glass	11
Odersun	Germany	CIS	roll-to-roll	glass	10
Wureth Solar GmbH	Germany	CIS	multi-source evaporation	glass	11.5
Sulfurcell	Germany	CuInGaS	Sputtering	glass	6.1
China Nuvo Solar Energy	China	CIGS		ceramic sleeve	
Shandong Sunvim Solar	China	CIGSSe	sputtering	glass	

국내에서는 유리기판을 활용하는 LG이노텍과 Teliosolar의 증발법 (evaporation)과 삼성전자의 2단계 공정(precursor-reaction)법이 상용화 개발이 진행되고 있으며, 중소기업으로서 ㈜대양금속에서 스텐레스 스틸 코일을 이용한 롤투롤(roll-to-roll) 유연 CIGS 태양전지 상업화 생산을 선언한 바 있다. 그 외에 많은 기업들에서 다양한 형태의 CIGS 태양전지 상업화 기술을 개발하고 있는 중이다.

태양전지 산업과 기존의 반도체 메모리 및 디스플레이 산업의 차이점은 대표적인 기술로드맵 기준지표가 아직 개발되어 있지 않다는 점이다. 메모리는 저장용량(1GB, 4GB 등), 크기(5세대 및 8세대 등)에 비하여 태양전지는 발전단가 ($/kWh; LCOE, Levelized Cost Of Energy)가 유력해 지고 있다.

6. 맺은 말

박막태양전지는 핵심요소기술 및 기술최적화가 절대적으로 필요하다. 결정질 태양전지의 경우 최고 셀 효율(25%, mc-Si 태양전지)과 상용 모듈효율(20%, mc-Si 태양전지) 간의 격차가 적다. 반면에 박막형의 경우는 실험실 셀 (19.9%, CIGS 태양전지)효율 대비 양산 모듈효율(10~12%, CIGS 태양전지)의 차이가 약 50% 정도까지도 나고 있다. 향후 기술의 성숙에 따라 이 효율 차이는 줄어들 것으로 예상되며, 결정 실리콘 태양전지처럼 셀 효율 대비 모듈효율이 80% 이상까지 도달할 수 있을 것으로 전망된다. 그렇기때문에 CIGS 태양전지 기술은 50%의 셀-모듈간 효율 큰 격차만큼 많은 R&D 기회를 보이고 있다; 전환효율 향상, 태양전지모듈의 저가화, 긴 수명. 또한, 전환 효율의 향상과 더불어 무독성 재료의

사용, 신소재 TCO 발굴, 새로운 소자구조 및 모듈 구도 개발 등에도 많은 가능성이 열려 있다. 한국으로서는 CIGS 태양전지가 차세대 대표적인 박막태양전지 산업이 될 것으로 예상되는 만큼 많은 노력을 기울여 연구할 필요가 있다.

참고문헌

1. I.Repins, et. al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 2008; 16:235-239
2. D. Hariskos, et. al., EUPVSEC 2009, 3DO.4.5
3. H. Sugimoto, et. al., EUPVSEC 2009, 3DO.6.4.

김제하

- 1982 서강대학교 졸업, 물리학, 학사
- 1985 서강대학원 졸업, 물리학, 석사
- 1993 Univ. Arizona 졸업, Physics, Ph.D.
- 1984~1986 LS전선 연구소, 연구원
- 1988-1993 Arizona Research Lab, Research Associate
- 1993-2001 한국전자통신연구원, 선임연구원
- 2001-2008 한국전자통신연구원, 책임연구원
- 2006-2007 U. California, Irvine, Visiting Scientist
- 1998-현재, 한국전자통신연구원, 박막태양광 기술연구팀, 팀장