

3 Cu(In,Ga)Se₂ 박막태양전지의 요소 기술 및 산업 현황

글 조 대형 선임연구원, 정용덕 책임연구원 | 한국전자통신연구원 소재부품원천연구본부
신병하 교수 | 한국과학기술원 신소재공학과

1. 서론

태양전지는 빛에너지를 전기에너지로 바꾸는 장치를 일컫는다. 입력된 광자(photon)는 태양전지를 거쳐 전자(electron)로 변환되어 출력된다. 광자에 의해 내부에 발생한 전하들은 각각 P극과 N극으로 이동하고, 이에 의해 전위차가 발생하여 전류가 흐르게 된다. 이때, 조사된 빛에너지가 얼마나 손실 없이 효율적으로 전기에너지로 변환되느냐가 태양전지 성능 평가 가장 중요한 요소이다.

태양전지는 광흡수물질과 그 형태에 따라 종류가 다양하다. 실리콘(Si) 웨이퍼를 광흡수물질로 이용하는 결정질 Si 태양전지를 비롯하여, Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), CdTe, Si 박막 등을 이용한 박막 태양전지, 그 외에 페로브스카이트, 염료감응형, 유기 태양전지 등이 있다. 현재 태양전지 시장은 결정질 Si가 대부분을 차지하고 있으며, 그 이유로는 높은 광전변환 효율과 낮은 수준을 유지하고 있는 Si wafer

가격과 기존 Si 반도체 공정의 적용 용이성에 의한 공정단가 경쟁력 등을 들 수 있다.

결정질 Si과 더불어 소면적의 lab-scale에서 20% 이상의 고효율을 보인 태양전지 물질로는 CIGS, CdTe, 페로브스카이트, GaAs를 들 수 있다 (그림 1) [1,2]. 하지만 효율 외에도 해결

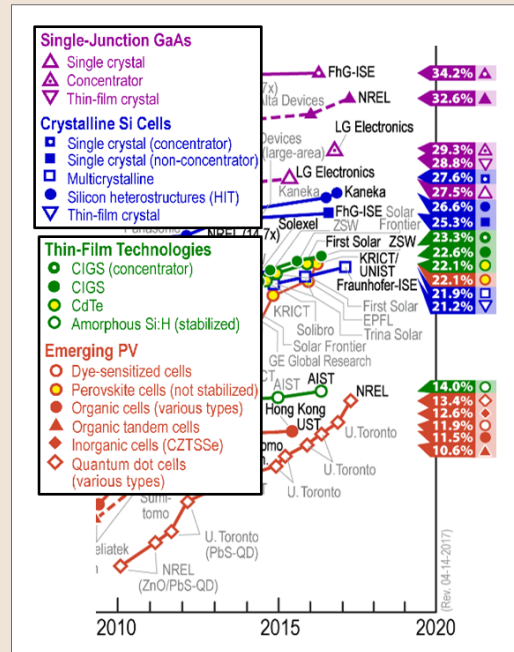


그림 1 ▶ 최근 태양전지 종류 별 효율 기록 추이 [2].

해야 할 여러 이슈가 존재한다. Si 태양전지의 경우 휘지 않고 잘 부러지는 wafer를 사용하여 평면 형태 외에는 적용하기 어렵다. CdTe는 여러 질병을 야기하는 Cd을 포함하고 있어 독성 문제와 소비자의 저항감을 이겨내야 하는 상황이다. 페로브스카이트 태양전지는 최근 비약적인 성능 개선을 보여 왔지만 대기 중의 수분에 의한 성능 불안정 문제를 해결해야 한다. GaAs 태양전지는 30% 이상의 매우 높은 효율을 보이지만 고가의 wafer와 증착 공정을 필요로 한다.

하지만 CIGS 태양전지는 앞선 이슈들로부터 비교적 자유롭다. 박막 형태이므로 원재료 사용량이 적어 공정단계 절감이 가능하고, 금속 또는 플라스틱과 같은 유연 기판에 적용 가능하며 수분과 고온의 환경에서도 성능 감소가 매우 적다. CdS 버퍼층이 주로 사용되고 있지만 Cd을 대체하기 위한 연구가 활발히 진행 중에 있으며 고성능의 Cd-free 태양전지가 보고되고 있다 [3,4]. 또한 최근에는 추가적인 재료 단가 절감을 위해 In, Ga을 대체하는 저가 물질 사용하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

2. CIGS 태양전지 단위층 요소 기술

CIGS 태양전지는 효율적인 전하 분리와 이동을 위해 각기 다른 역할을 하는 여러 층의 박막으로 이루어진다. 표 1에 CIGS 태양전지의 구조와 각 박막의 역할 및 형성 방법을 나타내

표 1 ▶ CIGS 태양전지 구성층의 역할과 증착 방법.

Material	Role	Method
MgF ₂	Anti-reflection coating	E-beam evaporation
Ni/Al	Front metal contact	E-beam evaporation
ITO, doped-ZnO	Front metal contact	RF sputtering
Undoped-ZnO	Buffer	RF sputtering
CdS, ZnS		Chemical bath deposition, RF sputtering
NaF, KF, RbF	Alkali metal supply	Thermal evaporation
CIGS	Absorber	Co-evaporation, sputtering/selenization
Mo	Back contact	DC sputtering
Soda-lime glass, polyimide, stainless-steel	Substrate	Cleaning

었다. 다양한 물질 및 공정 방법이 연구되고 있지만 20% 효율에 근접하며 가장 널리 쓰이는 구조와 형성 방법을 기준으로 하였다.

2.1 기판(substrate)

기판은 주로 소다회유리(soda-lime glass)가 사용된다. 소다회유리에는 CIGS 태양전지 효율을 증대시키는 sodium (Na)이 함유되어 있다. 또한 열팽창계수 (단위: $10^{-6} K^{-1}$)가 약 9 정도로 약 11의 열팽창계수를 가지는 CIGS와 비교적 동등한 수준이다. 소다회유리와 같은 투명 세라믹 계열인 Corning 7059와 quartz는 각각 4.6 및 0.59의 열팽창계수를 가져 CIGS와

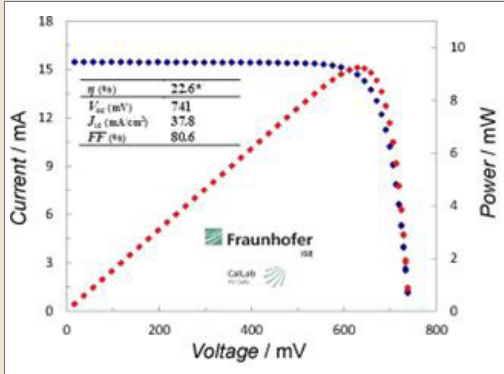


그림 2 ▶ 독일의 ZSW 연구소에서 달성한 22.6% 효율 CIGS 태양전지의 I-V 그래프 [6].

큰 차이를 보인다 [5]. CIGS 공정 시 최대 약 600 °C의 기판온도를 필요로 하기 때문에 기판과 단위층과의 열팽창계수 차이가 크면 부착성이 감소된다. 독일의 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 연구소에서는 soda회유리 기판을 이용하여 22.6%의 세계 최고 효율을 달성한 바 있다 (그림 2) [6]. 또한 일본의 Solar Frontier 사는 최근 PVSEC-27 학회에서 1 cm² 면적에서 23.3%의 비공인 기록을 보고한 바 있다.

유연 CIGS 태양전지 구현을 위해 폴리이머드, 세라믹과 같은 비금속 기판과 스테인리스스틸, 알루미늄, 티탄과 같은 금속 기판 등이 사용된다. 또한 이러한 기판은 유리보다 매우 가벼워 단위 무게 당 출력이 매우 높다. 유리 기판의 경우 약 10 W/kg을 보이는데 반해 폴리머 및 금속 기판은 40 W/kg 이상의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 유연 CIGS 박막태양전지의 제조에 있어서 해외의 선진업체들은 이미 스테인리스스틸과 폴리이머드로 양분되는 금속과 고분자 기반의 유연 태양전지 제조 기술을 선도하고 있다.

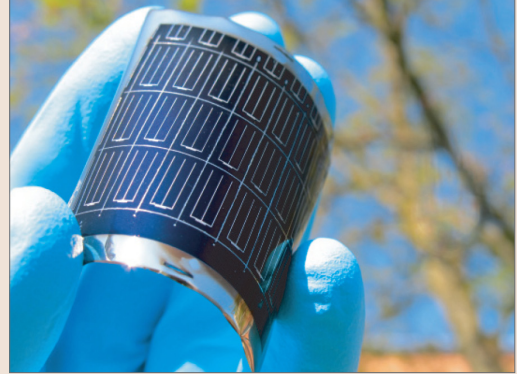


그림 3 ▶ 스위스의 EMPA 연구소에의 PI 기판에 제작된 CIGS 태양전지 사진 [7].

폴리이머드 기판은 잘 휘므로 그에 맞는 박막 공정 조건이 필요하며, 450 °C 이상에서는 변형이 일어나기 때문에 저온의 CIGS 형성 기술이 필요하다. 저온에서는 박막 내 원소의 확산이 느려지므로 CIGS 증착 공정 조절을 통해 원소 분포를 적절히 조절할 필요가 있다 [7]. 스위스의 Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology Empa (EMPA) 연구소에서는 폴리이머드 기판에서 20.4%의 효율을 보고한 바 있다 (그림 3) [8].

스테인리스스틸 기판은 600 °C 이상의 고온에서도 공정이 가능한 반면, 공정 시 유리 및 폴리이머드 대비 낮은 평탄도를 고려해야 한다. 또한 전도성을 띄기 때문에 스테인리스스틸 기판 상에 바로 후면전극부터 제작 시에 모노리식 모듈 제작이 어렵다. 또한 기판에 함유되어 있는 철(Fe)과 같은 불순물이 CIGS 고온 공정 시에 광흡수층으로 확산될 우려가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 SiO₂, Cr과 같은 확산방지막을 기판과 후면전극 사이에 형성하기도 하며 [9,10], 특히 SiO₂와 같은 절연층 사용 시 모노리식 집적도 가능한 장점이 있다.

미국의 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 연구소는 스테인리스스틸 기판 상에 17.4%의 셀 효율을 보고한 바 있다 [11].

2.2 후면전극(back contact)

CIGS 태양전지에서의 후면전극은 대부분 DC sputtering을 통해 증착된 Mo 박막이 사용된다. Mo와 CIGS 사이에 MoSe_2 층이 형성되어 이상적인 ohmic 접합이 형성되어 전하 이동을 수월하게 한다 [12]. 또한, Mo 박막의 원기동형태의 결정립 성장은 소다회유리의 Na의 CIGS로의 확산을 용이하게 한다 [13]. Mo 후면전극은 $0.24 \Omega/\text{sq}$. 이하의 면저항을 가져야 하는 것으로 알려져 있다 [14]. 면저항 감소를 위해 두께, 공정압력 등을 조절해야 한다. 면저항 이외에도 기판과 상부층과의 스트레스 최소화를 위해 공정 압력 및 적층 구조 설계에 대한 연구도 진행된 바 있다 [15,16].

2.3 광흡수층(absorber)

광흡수층은 태양전지의 성능에 가장 큰 비중 차지하는 핵심 층이다. 광자가 광흡수층에 도달되면 전자-정공 쌍이 효과적으로 분리되어, 손실 없이 전자는 전면전극으로, 정공은 후면전극으로 이동해야 한다. 광흡수층의 품질이 낮으면 이러한 전하의 분리 및 이동이 원활하지 않아 태양전지 성능이 감소하게 된다. CIGS는 3족의 Ga/In 조성비가 증가할수록 전도띠 바닥(conduction band minimum)이 증가한다. 때문에 Ga/In조성비를 조절하여 밴드갭을 1.0 eV에서 1.7 eV까지 조절 가능하다.

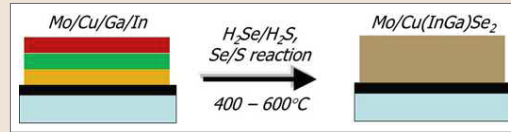


그림 4 ▶ 금속전구체 공정 후 셀렌화/황화 공정을 통해 CIGS 박막을 형성하는 공정 모식도 [18].

CIGS 광흡수층은 주로 동시증발법(thermal co-evaporation)과 스퍼터 후 셀렌화를 거치는 2-step 방식이 있다. 이 외에도 습식 솔루션 공정, 단일 스퍼터 공정 등 공정단가 절감을 위한 기술도 시도되고 있다.

동시증발법은 Cu, In, Ga, Se 원소들을 각각의 증발기(effusion cell)를 이용하여 동시에 증착하는 방식이다. 4가지 원소를 동시에 증발시키기도 하며 일부 원소를 순차적으로 증발시키는 multi-stage 방식을 이용하기도 한다. 동시증발법은 원소 각각의 증착률을 조절 가능한 장점이 있다. 특히 multi-stage 공정 시 In-Ga-Se, Cu-Se, In-Ga-Se 순서의 공정을 통해 Ga 및 In 조성의 깊이방향 기울기를 미세하게 조절할 수 있다. 때문에 태양전지 고효율 달성이 가능하며 최근 세계 최고 효율 기록은 대부분 동시증발법으로 성장된 CIGS 광흡수층을 이용하여 얻었다 [6,8,17]. 하지만 동시증발법은 대면적 양산 시, 균일도와 multi-stage 공정 구현이 상대적으로 어렵다.

스퍼터/셀렌화 방식은 Cu, In, Ga 금속 혹은 Se 화합물을 스퍼터를 이용해 증착하고 셀렌화하여 CIGS 박막을 형성하는 방법이다 (그림 4) [18].

셀렌화는 H_2Se 가스 또는 Se 분위기에서 진행된다. 동시증발법에 비해 대면적 균일도 확보가 용이하여 양산 시 장점을 가진다. 하지만

미세한 조성 기술을 구현하는 데에는 어려움이 따른다. 금속 전구체의 적층 순서 조절과 황(sulfur) 공급을 통해 에너지 레벨을 조절하는 방법에 대해 연구되고 있다. 이러한 방법을 통해 일본의 Solar Frontier 사는 22% 이상의 셀을 보고한 바 있으며, 현재 고효율 모듈을 양산 및 판매 중에 있다 [4].

2.4 알칼리 금속(alkali metal)

CIGS로의 알칼리 금속 공급은 태양전지 성능 향상을 위해 필수적이다. CIGS 박막은 주로 결정립 경계에 In_{Cu} , V_{Se} , $\text{V}_{\text{Cu-Se}}$ 와 같은 결함을 포함한다. 알칼리 금속은 이러한 결함을 패시베이션 시켜주므로써 전하 이동도와 전하 농도를 증가시켜 Fermi 준위를 전도띠에 근접시켜 p-type 특성을 강화시킨다. 때문에 소자 내의 built-in 준위를 증가시켜 개방전압 향상시킨다.

알칼리 금속 중 Na는 가장 오랫동안 이용된 바 있다. 주로 소다회유리 기판을 사용할 경우 500°C 이상의 CIGS 증착 공정 시 기판에 함유되어 있는 Na이 Mo 후면전극을 지나 CIGS로 확산된다. 하지만 이러한 방법은 기판 내의 Na 함유가 불균일할 경우 모듈 성능의 저하를 야기하며, 소다회유리 이외의 기판을 사용할 경우 적용하기 어렵다. 때문에 NaF, Na_2S 와 같은 화합물을 CIGS 형성 전/후에 공급하는 방법이 연구된 바 있으며 [19,20], 기판과 Mo 후면전극 사이에 Na이 함유된 층을 형성하여 CIGS 공정 시 확산되도록 한 방법도 시도된 바 있다 [21].

최근에는 Na 이외에 K, Rb, Cs과 같은 알칼리 금속 공급이 시도되고 있으며, 세계 최고 효

율은 RbF 화합물을 CIGS 공정 후에 공급하는 방식으로 22.6%가 달성된 바 있다 [6]. CIGS 태양전지의 최고 효율은 2000년대에 미국 NREL 연구소가 달성한 약 20% 수준으로 머물러 있다가, 2013년 이후에 유럽의 ZSW, EMPA와 같은 연구소의 주도로 Na 이외의 알칼리 금속 공급이 본격적으로 연구되면서 비약적인 증가를 보였다.

2.5 버퍼층(buffer)

버퍼층은 CIGS 흡수층과 투명전극 사이에 형성된다. 표1에서는 CdS (or ZnS)와 undoped-ZnO를 버퍼층으로 칭하였다. 버퍼층은 CIGS와 투명전극 간의 격자상수 불일치와 에너지 밴드갭 차이를 감소시켜 전하 이동 손실을 개선시키는 역할을 한다. 또한 스퍼터링을 이용한 투명전극 증착 시 플라즈마에 의한 흡수층 손상을 방지하는 역할을 한다.

버퍼층 물질로는 CdS가 가장 널리 쓰이며 주로 chemical bath deposition (CBD) 방법으로 제작된다. CBD는 쉽고 빠르게 박막 성장이 가능하며 비교적 낮은 온도 (80°C 이하)에서 제작된다. 또한 증착 초기의 암모니아 용액에 의해 CIGS 표면 세정 효과도 보이는 장점이 있다. 하지만 CdS는 독성인 Cd을 포함하며 밴드갭이 약 2.4 eV로 500 nm 이하의 파장대에서 광흡수손실이 일어나는 문제가 있다. 또한 CBD법은 진공공정을 기반으로 한 CIGS 제작 공정들과 호환성이 적은 단점이 있다. 때문에 Cd을 포함하지 않는 물질과 CBD 이외의 다른 공정 방법들이 다양하게 연구되고 있다.

Cd-free 물질로는 Cd 대신 Zn가 포함된 ZnS, Zn(O, S), ZnMgO 등과 In_2S_3 등이 연구되고 있다. 완전한 에너지 준위 조절과 높은 광투과율이 요구된다. CBD 이외의 공정 방법으로는 스퍼터링, 원자층증착법(ALD), evaporation, ion-layer gas reaction (ILGAR) 등이 있으며, 박막 품질과 공정 용이성 등이 고려될 필요가 있다.

2.6 투명전극(transparent conducting oxide)

투명전극은 CIGS 태양전지 뿐 아니라, 다양한 광/전자소자에 응용된다. 빛을 투과시킴과 동시에 전기전도성을 가지는 것을 특징으로 한다.

약 1.1 eV의 밴드갭 에너지를 갖는 CIGS 흡수층은 약 1,100 nm 파장 이하의 빛을 흡수하게 된다. 또한 CIGS 상에 형성되는 버퍼층의 경우 약 400 nm 이하의 빛을 흡수하게 된다. 때문에 투명전극은 400 nm - 1,100 nm의 파장 범위에서 높은 광투과율을 가져야 한다.

흡수층에서 생성된 전하를 금속 전면전극까지 효과적으로 이동시키기 위해서는 높은 전기전도도가 요구된다. 소규모 셀에서는 주로 finger grid 형태의 금속 전면전극이 투명전극 위에 형성되는데, 이 때 전하를 grid까지 손실 없이 보내주어야 고효율을 기대할 수 있다. 또한 대면적 모듈에 적용되는 모노리식집적 방식으로 제작 시에도 투명전극은 전하를 효율적으로 이동시켜야 한다. 때문에 수평방향의 저항이 낮아야 하므로 주로 CIGS 태양전지에서의 저항 평가 시 주로 면저항(sheet resistance)을 고려한다. 면저항은 비저항에 두께를 곱한 값으로, 단위는 Ω/sq .이다. 두께를 높이

면 면저항이 감소하여 태양전지의 직렬저항을 감소시켜 충전률(fill factor)을 높이지만, 광투과율이 감소하여 태양전지의 단락전류(short circuit current)가 감소한다. 때문에 적절한 두께와 비저항값을 가지는 물질과 공정 조건을 선택할 필요가 있다. NREL에서는 69 Ω/sq 의 면저항, 120 nm 두께의 Al:ZnO 투명전극으로 20% 효율의 CIGS 태양전지 성능을 보고한 바 있다 [14].

투명전극 물질로는 ITO (indium tin oxide) 와 도핑된 ZnO 계열 물질이 널리 이용된다. ITO는 성능이 우수하여 저온의 공정조건에서도 우수한 광투과율과 저항 특성을 보인다. Al(알루미늄), B(보론) 등을 도핑한 ZnO 계열 물질도 우수한 투명전극 특성을 보이며 ITO보다 재료 단가가 상대적으로 저렴한 장점이 있다.

투명전극은 주로 스퍼터링을 이용하여 Ar 혹은 Ar/ O_2 혼합가스 분위기에 증착된다. 기판온도가 증가할수록 광투과율과 저항 특성이 개선되지만 하부층의 성능 저하를 방지하기 위해 주로 200°C 이하에서 증착을 진행한다 [22].

2.7 금속 전면전극(front metal contact)

금속 전면전극은 모노리식집적 모듈 제작 시에는 필요하지 않지만 대부분의 소규모 셀 제작 시에 사용되게 된다. 주로 Al 단일층 또는 Ni/Al, Ni/Al/Ni의 적층 구조로 제작하게 된다. 증착 방법은 e-beam evaporation 또는 thermal evaporation 등이 있다. 금속 전면전극은 태양광을 투과시키지 못하므로 국소 영역에만 형성하여야 한다. 너무 넓은 영역으로 형성할 경

우 흡수층에 도달되는 빛이 적어지는 반면, 너무 좁은 영역으로 형성할 경우 전극의 수평 방향의 저항이 커져 태양전지 성능이 감소한다. 때문에 투명전극과 금속전극의 저항 성분을 고려하여 금속전극을 설계해야 한다. 통상 효율적인 전하 수송을 위해 0.01 Ω/sq. 이하의 면저항, 1×10^{-6} Ωm² 이하의 접촉저항이 요구된다.

2.8 반사방지막(anti-reflection coating)

반사방지막은 태양광이 입사되는 가장 상층부에 형성된다. 투명전극과 공기 사이의 굴절률을 갖는 물질을 형성함으로써 태양광의 반사를 줄여 태양전지로의 입사광을 늘려주는 역할을 한다. 500 nm 파장에서, ITO 투명전극의 굴절률은 약 2.0이므로 그보다 작은 물질을 증착시킨다. MgF₂ 박막이 가장 널리 쓰이며 500 nm 파장에서 약 1.39의 굴절률을 가진다. 반사방지막을 형성할 경우 약 5% 정도의 단락 전류 향상을 기대할 수 있다.

3. 산업 현황

3.1 결정질 실리콘 태양광 산업

최근까지 태양광에너지의 발전단가는 석탄 및 가스 등의 화력발전 단가보다 높았다. 때문에 보조금과 같은 정책적 지원 없이는 태양광이 타에너지 대비 가격경쟁력이 낮아, 친환경적이라는 장점만으로 시장을 설득하는 데에는 한계가 있었다. 하지만 현재 주요국의 태양광



그림 5 ▶ 태양광 모듈 및 시스템 가격현황 및 전망 [23].

발전단가는 \$80/MWh 이하로 빠르게 하락하고 있으며 석탄과 경쟁할 수 있는 수준이다. 특히 유럽에서는 탄소세를 부과함으로써 석탄 발전의 경쟁력은 지속적으로 낮아지고 있다. 2017년 현재 다결정 실리콘 태양전지 기준으로 각 가치사슬(value chain) 별 가격은, 웨이퍼는 약 \$0.6/piece, 셀은 약 \$0.25/W, 모듈 가격은 약 \$0.5/W이며, 특히 시스템 단가는 처음으로 \$1/W를 달성할 전망이다 (그림 5). 또한 지난 5월 출범한 문재인 정부는 재생에너지 보급을 확대하여 2030년까지 재생에너지 비중을 20%까지 늘릴 것을 목표로 삼았다. 이와 같이 가격경쟁력 상승과 더불어 정부의 정책 지원이 더해진다면 태양광 수요는 지속적으로 증가할 것으로 판단되며, 특히 그리드패리티가 충분히 도달되는 2023년경에는 폭발적으로 성장할 것으로 전망된다 [23].

3.2 CIGS 태양광 산업

CIGS 및 CdTe를 필두로 하는 박막태양전지는 전체 태양전지 시장의 약 6%의 시장점유율을 보이고 있다. 이 중 CdTe 박막태양전지를 생산하는 First Solar사가 절반 이상을 차지한다. CIGS를 비롯한 박막태양전지의 결정질

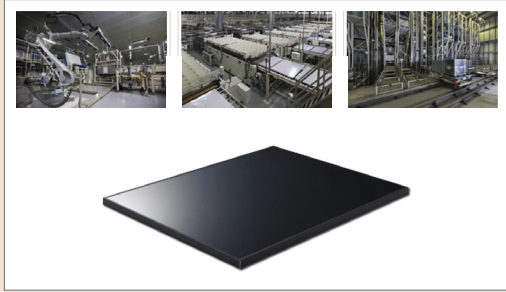


그림 6 ▶ Solar Frontier사의 Kunitomi Plant 전경 (상) 및 판매 중인 모듈 사진 (하) [24].

실리콘 태양전지에 대한 가격경쟁력은 실리콘 가격에 크게 좌우된다. CIGS 기업들은 2010년 이후에 실리콘 가격이 큰 폭으로 하락하면서 상당 수 사업을 접은 바 있다. 하지만 현재 여러 기업들이 양산을 준비 중에 있어 앞으로 CIGS 비중은 늘어 날 것으로 보인다.

6~7가지 원소(Cu, In, Ga, Se, S, Alkali-metal 등)를 대면적 기판에 균일하게 형성해야 하는 기술적 난관에도 불구하고 세계 여러 기업들이 기술 개발을 통해 양산에 힘쓰고 있다. 일본의 Solar Frontier사는 가장 활발히 CIGS 태양전지를 생산하고 있으며 약 1.1 GW의 생산 용량을 확보하고 있는 것으로 알려져 있다 (그림 6). 유럽의 Manz사는 CIGS turnkey 사업을 진행 중이고, Flisom사는 폴리머 기판 상의 유연 CIGS 태양전지 파일럿 라인을 운영 중이다. 중국의 Hanergy사는 Global Solar, Miasole, Solibro사 등을 인수하여 사업을 운영 중이다. 미국의 Solopower사는 stainless steel 기판 상에 도금 방식으로 CIGS를 형성하여 가볍고 유연한 CIGS 태양전지를 양산 중에 있다. 국내에서는 Solardin사가 모듈 turnkey 사업 중이다.

Avancis사를 인수한 중국의 CNBM사(중국건축자재유한공사)는 충북 오창에 150 MW급 생산라인 재가동 및 증설 예정으로 알려져 있다.

4. 맺음말

CIGS 태양전지는 고효율을 위해 각기 다른 역할을 하는 단위층을 포함한다. 각 층에 요구되는 성능을 만족하기 위해 적절한 물질 선택, 공정 조건 탐색, 구조 설계 등이 이루어져야 한다. 본 글에서는 CIGS 태양전지에 필요한 단위층의 요소 기술을 소개하고 현재 태양광 산업 현황에 대해 짚어보았다. 지난 수십 년간 CIGS 태양전지가 연구되어 왔지만 구조, 물질, 공정 조합의 경우의 수가 너무나 다양하여 현재에도 여전히 기술 진보가 진행 중이다. 최근에는 이론적 효율 한계에 근접하는 효율이 보고되고 있으며, 추가적인 성능 향상을 위하여 이중 태양전지의 접합을 통한 연구도 시도되고 있다. CIGS 태양광 산업의 성장을 위해서는 태양광 산업 전체의 성장이 필요할 뿐 아니라, CIGS가 가지는 장점을 살려 고유의 시장을 개척하는 노력이 필요하다. 🌞

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. H. Ho-Baillie, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25 (2017).
- [2] <http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (2017).
- [3] A. Wachau, J. Schulte, P. Agoston, F. Hübler, A. Steigert, R. Klenk, F. Hergert, H. Eschrich, and V. Probst, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25, 696 (2017).
- [4] K. Takuya, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 04CA02-1 (2017).
- [5] D. Rudmann, A. F. da Cunha, M. Kaelin, F. Kurdessau, H. Zogg, A. N. Tiwari, and G. Bilger, *Applied Physics Letters*, 84, 1129 (2004).
- [6] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte, and M. Powalla, *Phys. Status Solidi RRL* 10, 583 (2016).
- [7] A. Chirilă, S. Buecheler, F. Pianezzi, P. Bloesch, C. Gretener, A. R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, J. Perrenoud, S. Seyrling, R. Verma, S. Nishiwaki, Y. E. Romanyuk, G. Bilger, and A. N. Tiwari, *Nat. Mater.*, 10, 857 (2011).
- [8] A. Chirilă, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A. R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, D. Keller, C. Gretener, H. Hagendorfer, D. Jaeger, R. Erni, S. Nishiwaki, S. Buecheler, and A. N. Tiwari, *Nat. Mater.*, 12, 1107 (2013).
- [9] W. J. Lee, D. H. Cho, J. H. Wi, W. S. Han, J. Kim, and Y. D. Chung, *Materials Chemistry and Physics*, 147, 783 (2014).
- [10] D. H. Cho, Y. D. Chung, K. S. Lee, K. H. Kim, J. H. Kim, S. J. Park, and J. Kim, *Current Applied Physics*, 13, 2033 (2013).
- [11] M. A. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Swartzlander, F. Hasoon, and R. Noufi, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7, 311 (1999).
- [12] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami, and T. Wada, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67, 209 (2001).
- [13] A. Rockett, K. Granath, S. Asher, M. M. Al Jassim, F. Hasoon, R. Matson, B. Basol, V. Kapur, J. S. Britt, T. Gillespie, and C. Marshall, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 59, 255 (1999).
- [14] I. Repins, S. Glynn, J. Duenow, T. J. Coutts, W. K. Metzger, and M. A. Contreras, *Proc. SPIE 7409, Thin Film Solar Technology*, p. 74090M.
- [15] J. H. Yoon, T. Y. Seong, and J. h. Jeong, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21, 58 (2013).
- [16] P. Blosch, A. Chirila, F. Pianezzi, S. Seyrling, P. Rossbach, S. Buecheler, S. Nishiwaki, and A. N. Tiwari, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1, 194 (2011).
- [17] I. Repins, M. A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To, and R. Noufi, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16, 235 (2008).
- [18] 윤선진 외, *박막 태양전지의 기술개발 동향, 전자통신동향분석 제27권 제1호*, 한국전자통신연구원, 2012.
- [19] D. Rudmann, G. Bilger, M. Kaelin, F. J. Haug, H. Zogg, and A. N. Tiwari, *Thin Solid Films*, 431-432, 37 (2003).
- [20] Y. M. Shin, D. H. Shin, J. H. Kim, and B. T. Ahn, *Current Applied Physics*, 11, S59 (2011).
- [21] R. Wuerz, A. Eicke, F. Kessler, P. Rogin, and O. Yazdani-Assl, *Thin Solid Films*, 519, 7268 (2011).

[22] D. H. Cho, Y. D. Chung, K. S. Lee, N. M. Park, K. H. Kim, H.-W. Choi, and J. Kim, Thin Solid Films, 520 (2012).

[23] 강정화 외, 2017년2분기 태양광산업 동향, 분기보고서 vol. 2017-분기-02, 한국수출입은행, 2017.

[24] <http://www.solar-frontier.com/eng/index.html>(2017).

저/자/약/력



성명	조대형	
학력	2007년 2009년	고려대학교 전기전자전파공학부 공학사 고려대학교 전자전기공학과 공학석사
경력	2009년 - 현재	한국전자통신연구원 선임 연구원



성명	정용덕	
학력	1995년 1997년 2002년	연세대학교 물리학과 이학사 연세대학교 물리학과 이학석사 연세대학교 물리학과 이학박사
경력	2002년 - 현재 2008년 - 2009년 2010년 - 현재	한국전자통신연구원 책임연구원 University of Delaware 방문연구원 과학기술연합대학원대학교 교수



성명	신병하	
학력	2000년 2002년 2007년	서울대학교 재료공학부 공학사 미시간대학교 재료공학과 공학석사 하버드대학교 응용물리 이학박사
경력	2007년 - 2010년 2010년 - 2014년 2014년 - 현재	스탠포드대학교 박사후연구원 IBM 왓슨 연구소 연구원 한국과학기술원 조교수