

태양전지 시장 동향 및 CIGS 기술 경쟁력



남정규
삼성 SDI Materials
R&D 센터
수석



이동호
WonCIGS Co, Ltd.
부장



양정엽
군산대학교 물리학과
조교수



김동선
WonCIGS Co, Ltd.
대표

개 요

CuInSe₂(CIS) 박막 태양전지는 Cu vacancy에 의해 형성되는 P형 화합물 반도체를 사용한 박막 태양 전지로 10^{-5}cm^{-1} 정도의 높은 광흡수계수를 가지고 있고, 구성 원소의 비율을 조절하여 광흡수 특성을 결정하는 밴드갭(E_g , eV) 조절이 가능하여 많은 주목을 받아왔다.^[1] 밴드갭 조절은 In 자리에 Ga, Se 자리에 S를 치환하여 가능하고, Ga/(In+Ga)과 S/(S+Se) 비율에 따라 CIS 광흡수층의 밴드갭은 1.0eV에서 1.7eV까지 가능하다.^[2,3] 하지만, 3개 원소에서 원소의 추가로 4개 또는 5개의 원소로 박막을 만들게 되어 균일한 상(phase)의 제어가 어렵게 된다. 이런 이유로 작은 셀 단위에서는 고효율이 많이 발표되었지만, 미니 모듈 및 양산 모듈에서는 고효율이 어렵다고 알려져 왔다. CIS 박막 태양전지 구조는 그림 1과 같은 이종접합(heterojunction) 구조를 갖는다. 태양전지 경기 침체로 박막 태양전지 침체되는 경향이 있었지만, 최근 연구 개발 기관 및 모듈 생산 기업을 중심으로 경쟁적으로 최고효율을 발표하고 있고, 본 보고서에서는 최근의 태양전지 시장 동향과 기술적 부분에서 진행되고 있는 연구 개발 동향 및 CIS 박막 태양전지의 경쟁력에 대해 말하고자 한다.^[4]

태양전지 기업 동향

태양전지 시장은 지속적으로 공급 과잉이 계속되고 있으며, 2015년 태양전지 모듈 가격은 단결정 실리콘

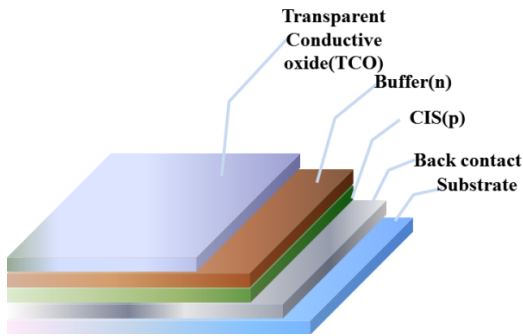


그림 1. 이종접합 구조의 CIS 박막 태양전지

콘 전지 \$0.44/W, 다결정 실리콘 전지 \$0.30/W까지 떨어진 상황이다. 2014년 대비 모듈 가격의 하락세가 완만한 경향을 보이고 있다. 공급과 수요를 비교하여 공급 과잉의 정보를 판단하기 위해 그림 2에 예상되는 태양전지 시장 수요를 보여주고 있다. 2015년은 58GW, 2016년은 63GW의 수요가 각각 예측되고 있으며, 2015년은 80GW의 태양전지가 생산될 것으로 보여 수요와 예상 생산량을 비교해 보면 대략 22GW의 공급 과잉이 발생된 것으로 예측된다. 이런 이유로 지속적으로 모듈 가격은 하락할 것으로 예측되고 있다. 2016년에 발생할 태양전지 수요를 지역별로 검토해 보면 중국(19.2GW), 일본(13.7GW), 미국(10.8GW)에서 가장 큰 수요가 발생할 것으로 예측되며, 중국, 일본, 인도(3.2GW)를 포함한 아시아에서 가장 큰 수요 증가가 예상된다.^[5] 중국과 인도 시장은 규모와 성장성을 겸비한 가장 유망한 시장이며, 칠레 등 남미지역은 풍부한 일사량

을 바탕으로 높은 성장성이 기대된다. 미국, 유럽 등 선진국 태양전지 시장은 그리드패러티(grid parity) 도달에 따른 가정용 수요가 자발적으로 생겨나고 있으며, 금융과 결합한 다양한 사업 모델이 만들어질 것으로 예측된다.

그림 3은 태양전지 기업별로 생산 용량을 비교한 결과이다. 현재 판매되고 있는 태양전지의 90%는 Si wafer 기반의 태양전지이고 박막의 대략 10% 정도로 기존 발표된 보고서의 예상치에 비해 시장 점유율은 낮은 편이다. 이것은 결정계 태양전지의 가격 변동에 많은 영향을 미치는 wafer의 가격이 안정적으로 낮게 형성되고 있기 때문이다. Si 결정계 태양전지의 많은 양은 중국에 생산기지를 두고 있으며, 또한, 한화를 제외한 중국 회사들의 생산 용량이 가장 높다. 이 그림 3에는 표시되지 않았지만, CdTe계 박막 태양전지를 생산하고 있는 First Solar社가 2016년 2.7GW를 생산 목표로 하고 있다. 또한, CIGS 박막 태양전지를 생산하는 Solar Frontier社의 경우 일본 내에 1.1GW 정도의 생산 용량을 가지고 있다.

CIGS 태양전지 기업 동향

CIS 태양전지는 In 자리에 Ga를 추가(CIGS)하며 밴드갭 조절이 가능하고 밴드갭 프로파일을 개선하며, 2000년대 초반에 20% 이상의 고효율을 달성하였다.^[6] NREL에서 20.0%의 고효율을 동시증착법(co-evaporation)에 의해

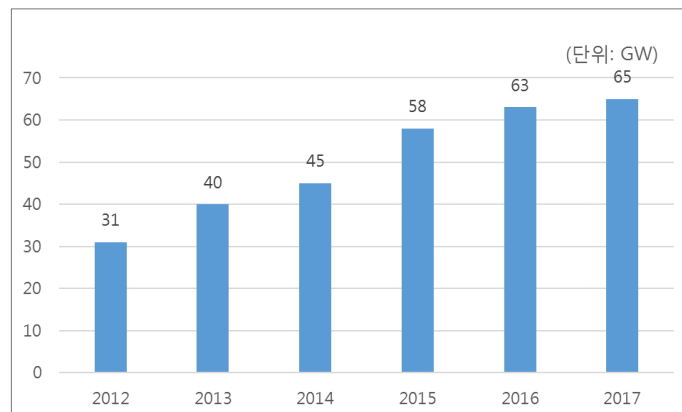


그림 2. 태양전지 시장 동향(예상 수요)

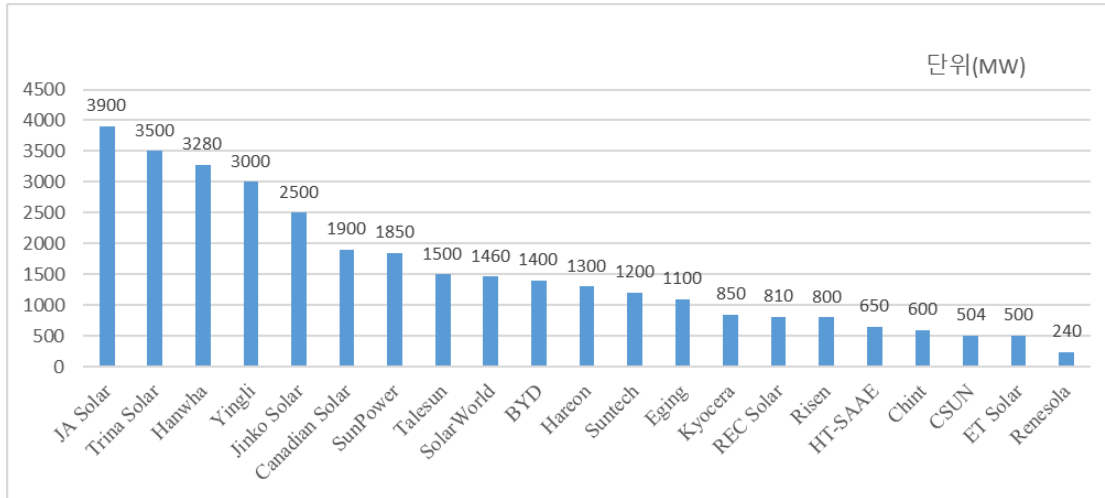


그림 3. 기업별 태양전지 생산 용량

박막을 제작하여 보고하였지만, 생산에 어려움이 있어서 생산이 되고 있지 않았다. Wuerth Solar에서 동시증착법으로 60MW 수준의 생산 라인을 가지고 있었지만 더 이상의 생산 용량의 증설은 이루어지지 않았다. 이 기술을 바탕으로 태양전지 설비 생산 기업인 Manz社에서 turnkey 사업을 진행하고 있고, 연구 기관인 ZSW(Zentrum für Sonnenenergie-und Wasserstoff-Forschung) 등과 협업을 통해 지속적으로 효율 향상을 시도하고 있으며 최근 21.7%의 고효율을 발표하였다. 하지만, 생산 라인에 동일한 기술을 적용하여 모듈 효율로 구현되기 위해서는 더 많은 연구 개발이 필요하다. 동시증착법에 의한 CISG 박막 태양전지의 개발은 독일을 중심으로 진행되었지만, 태양전지 사업이 침체되며 중국 기업이 독일 기업을 인수했다. 2012년까지 200MW의 생산 용량을 가졌던 기업인 Solibro (Q-Cell 자회사)는 중국의 에너지 기업인 Hanergy에 의해 인수되었다. 인수된 이후 2014년 20.5%의 효율을 발표하였다. Hanergy社는 Miasole社에서 인수한 플렉서블 생산 라인까지 포함하여 300MW의 생산 용량을 확보하고 있다.

동시증착법 이외에 셀렌화 방법(sputter and selenization)에 의한 연구 개발은 회사를 중심으로 많은 연구가 진행되었다. Siemens社의 기술을 바탕으로 Solar frontier社의 전신인 Showa Shell Solar社에 의해 NEDO의 지원으로 1993년부터 연구 개발이 진행되었다. 동시증착법과 달리

셀렌화 방법은 밴드갭 프로파일을 제어하기 위해 광흡수층의 표면에 S를 처리하여(CIGSS) 밴드갭을 확장하는 연구를 진행한 것이 특징적이다. Solar Frontier社는 현재 1.1GW의 생산 용량을 확보하고 있으며, 최근 Tohoku 지역에 150MW 증설하였다. Solar frontier社의 경우 생산 뿐만 아니라 연구개발도 꾸준히 진행하고 있다. 최근 셀 효율에서 22.3%의 최고 효율을 발표하여 CIGS의 효율 향상 가능성을 보여주고 있다.^[60] CIGSS 광흡수층을 이용한 태양전지의 경우에는 Manz社와 같은 turnkey 사업을 진행하고 있는 기업은 아직 없다. 결정계 태양전지와 CdTe 태양전지의 생산이 급격하게 늘어날 수 있었던 이유는 태양전지 사업 초기에 수요에 맞춰 기술을 보급할 수 있는 turnkey 업체의 역할이 컸다. 이런 측면에서 CIS 태양전지는 라인을 복제하여 생산 용량을 늘릴 수 있을 정도로 기술은 보편화되지 않았다고 볼 수 있다. 초기 Centrotherm社에서 RTP(Rapid Thermal Process) 방법에 의해 turnkey 사업을 하고자 하였으나 성공하지 못하고 사업을 철수하였다.

CIS 박막 태양전지는 여러 연구 기관에서 꾸준히 기술을 개발하고 있고 현재 수준에서 생산 모듈, 미니 모듈, 셀로 구분하여 그림 4에 효율 경향을 도식화 하였다. 셀 효율에서는 일본의 Solar frontier社, 독일의 ZSW가 꾸준히 효율 향상을 보여주고 있으면, 각각 최고 효율 22.3%, 21.7%

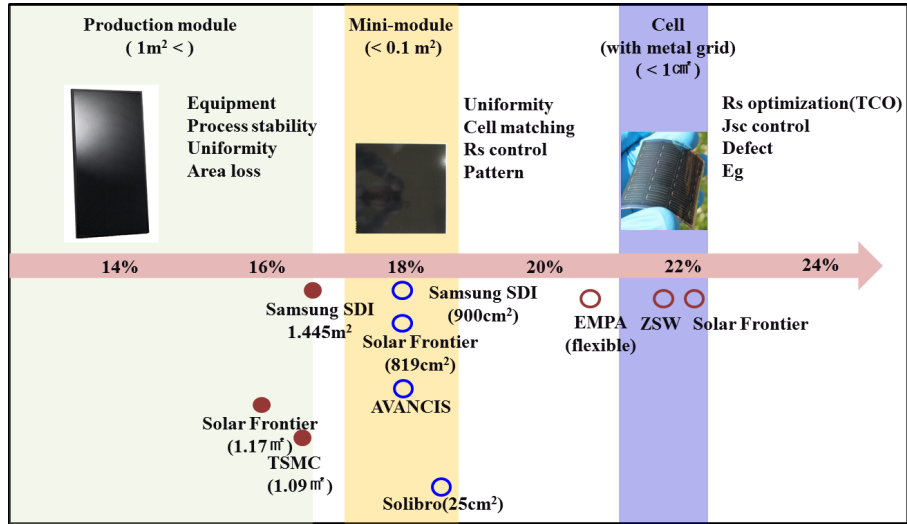


그림 4. CIS 태양전지 크기에 따른 효율 비교

를 달성하였다.^[6] EMPA에서는 flexible 기판을 사용하여 20.4% 고효율 달성한 결과를 2013년에 발표하였다.^[7] 또한, Solibro社에서 $5 \times 5\text{cm}^2$ 크기의 미니 모듈로 18.7%의 효율을 발표하였고, 셀렌화 방법을 적용하여 삼성 SDI에서 17.9%의 고효율 미니 모듈 기술을 발표하였다. 또한, 대면적 모듈에서도 16.0%(total area, aperture area 기준 17.1%)의 고효율 모듈 제작 기술을 발표하였다.^[8,9]

국내에서는 연구소와 학교 중심으로 연구가 진행되었고, 2000년 중후반부터 삼성 SDI와 LG 이노텍에서 각각 셀렌화 방법과 동시 증착법으로 연구개발을 진행하고 있었지만 현재는 중단된 상태이다. 또한, 현대중공업과 생고방의 자회사인 Avacis가 합작한 현대-이반시스도 투자 철회로 사업이 중단된 상태이다. 삼성 SDI의 경우 2013년 미니 모듈과 생산 모듈 크기로 세계 최고 수준의 효율을 발표했지만, 투자하지 않기로 결정하고 국책과제로 개발된 관련 기술을 원익-IPS에 이관하였다.

CIGS 기술 동향

최고 효율 경쟁 심화

CIGS 효율은 2000년대 초 NREL에서 20%에 근접하는

효율을 발표하고 이후 20.0% 초반까지 밴드갭 profile 개선, Na 도핑, 결함 제어, grain boundary 제어, 결정 방향 제어등과 같은 기술을 적용하여 NREL에서 향상된 효율을 발표하여 왔다. 2010년부터는 독일의 연구기관인 ZSW에서 NREL보다 높은 20.8% 효율을 발표하며 기술 경쟁을 가속하였다. 알카리 금속인 K를 후처리하여 밴드갭 제어 및 접합부의 특성을 개선하였다. 고효율을 위해서는 Cu vacancy 및 cation antisite와의 balance를 최적화하는 것이 필수적이다. 이와 같은 기술은 EMPA에서 플렉서블 기판에 먼저 적용하여 20.4%의 효율을 발표하며 플렉서블 기판에서도 효율 향상이 가능하다는 것을 보여주었다. 그림 5는 Post deposition treatment(PDT) 방법을 적용한 기술을 도식화하여 보여주고 있다.^[7] CIGS 층을 형성한 후 NaF나 KF를 이용하여 post treatment를 진행하여 Na, K를 도핑하는 공정을 진행하였다. ZSW는 이후에도 지속적인 디바이스 최적화를 진행하여 21.7%의 개선된 효율을 발표하였다. 위의 방법은 모두 CIGS 박막을 동시 증착법으로 성막한 결과들이다. 스퍼터링 후 셀렌화 진행하는 방법에 의한 최고 효율은 거의 발표되지 않았지만, 최근 Solar Frontier社에서 20.9%의 고효율을 발표하였다. Solar Frontier社의 경우 버퍼층으로 다른 고효율 발표에 사용된 CdS와 달리 ZnS계 박막을 사용하였다. Eg이 크기 때문에

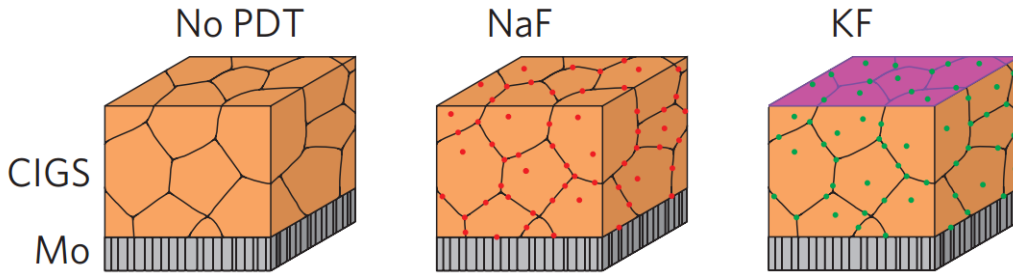


그림 5. Post Deposition Treatment(PDT)를 통한 KF 첨가^[7]

광투과 효과에서는 장점이 있지만, E_g 가 너무 커 생성된 전하의 흐름에 영향을 미칠 수 밴드 배열(bandgap alignment)을 가지고 있어서 1% 내외의 효율 저하가 있다고 보고되었다. 형성된 박막의 두께와 성막 특성을 개선하여 버퍼층의 wide bandgap의 특성을 최대한으로 활용한 것으로 보인다. 이후 Solar Frontier에서는 2016년 초에 22.3%라는 최고 효율을 발표하여 CIGS 박막 태양전지의 효율 향상 가능성을 계속해서 보여주고 있다.

박막 태양전지 경쟁력 및 개발 방향

그림 6에서 보는 것처럼 CIGS 태양전지의 경우 이론적으로 밴드갭이 1.4~1.5eV일 때 가장 높은 효율이 가능하다. 현재 보고된 최고 효율은 밴드갭이 1.1~1.2eV일 때 가장 높았고, 점차적으로 밴드갭이 커지면서 효율도 올라가는 경향을 보이고 있다. 태양전지의 효율은 개방전압과 단락전류 그리고 Fill factor(FF)의 곱으로 표현되는데, 개방전압과 단락전류의 곱이 가장 높을 때 가장 높은 효율을 갖기 때문이다. 개방전압과 단락전류는 소재의 밴드갭과 광흡수계수에 크게 영향을 받고 이의 조절은 태양전지 효율 향상에 중요한 영향을 미친다. 이런 관점에서 본다면, CIGS(CIGSS)소재는 가장 적합하다고 볼 수 있다. 높은 광흡수계수와 밴드갭의 조절이 소재의 조성 변화에 의해 조절이 가능하기 때문이다. 박막 태양전지에서 가장 높은 시장 점유율을 보이고 있는 CdTe의 경우 밴드갭이 1.4eV 정도로 이상적이지만 CIGS에 비해 광흡수계수가 높지 않다. 최고효율 CIGS의 경우 현재 낮은 밴드갭을 갖지만, CdTe

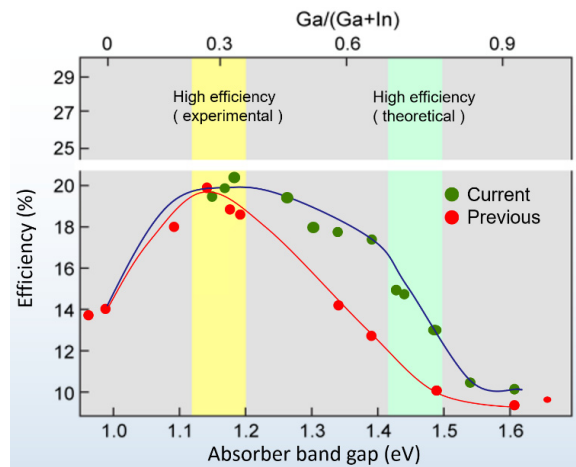


그림 6. CIS 밴드갭에 따른 태양전지 효율 분포

보다 셀 효율에서는 우위를 점하고 있으며 향후 효율적인 면에서 개선될 가능성을 충분히 가지고 있다고 볼 수 있다. 표 1에서 본 것처럼, CIGS의 막특성 및 밴드갭 구조를 변경하여 V_{oc} 를 개선할 수 있고, 셀렌화 방법을 이용하여 CIGS층을 형성 할 경우 p-n 접합 특성을 개선한다면 효율 향상이 있을 것으로 판단된다. FF는 p-n 접합 특성과 관련된 n-factor, 양쪽 전극의 수평저항 성분, 접촉 저항, 수직 저항과 관련된 직렬 저항(R_s), 누설전류와 관련된 셉트저항(R_{sh})으로 구분될 수 있다. 이와 같이 많은 성분들이 얽혀 있어 가장 영향성이 큰 인자를 도출하여 개선할 필요가 있다. 셀을 평가할 때는 전극의 두께를 충분히 두껍게 하거나 금속 grid를 적용하기 때문에 직렬 저항 성분은 크게 줄인 상태로 평가를 진행한다. 양산 모듈에서는 셀 개발과 동일한 방법으로 FF를 개선하기 어렵기 때문에 셀과 모듈의 효율 측정 시 FF가 가장 큰 차이를 보인다. 또



표 1. 태양전지 연구 기관별 효율 및 효율 parameter 비교

Company	Device	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	FF(%)	Efficiency(%)	Cell/module
Solar Frontier	CIGSS	0.722	39.4	78.2	22.3	Cell
ZSW	CIGS	0.757	34.77	79.2	21.7(KF)	Cell
ZSW	CIGS	0.720	36.33	79.0	20.7(KF)	Cell
NREL	CIGS	0.690	35.55	81.2	20.0	Cell

한, 모듈 제작 시에는 셀에는 없는 패턴이 포함되기 때문에 패턴에 의해 발생할 수 있는 접촉 저항 성분도 직렬 저항 성분에 크게 영향을 미친다. FF의 개선과 광 포집 특성을 올릴 수 있는 TCO의 저항을 낮춘다면 고효율 양산이 가능하다.

맺음말

CIGS 태양전지의 개발은 90년대 중반부터 본격적으로 개발이 진행되어 왔다. 일본의 Solar Frontier社와 같이 꾸준히 생산을 하고 있는 기업도 있고, 경영악화로 어려움을 겪고 있는 기업도 있지만, 최근 5년 이내에 경쟁적으로 최고 효율을 발표하고 있어, 다른 태양전지에 비해 경쟁력이 더 있다고 판단된다. 또한, 고효율 라인업을 바탕으로 turnkey 사업을 진행하고 있는 회사도 있어 CIGS 박막 태양전지의 사업은 좀 더 확장이 진행될 것으로 보인다. 아직 최고 효율 셀과 양산 모듈간의 효율 격차가 크고 개선 가능성이 아직 많이 남아있어서 지속적인 양산 기술이 개발된다면 시장 경쟁력 확보가 가능할 것으로 보인다. 국내에서도 연구소의 기술 개발과 기업의 투자가 진행된다면 침체되어 있는 국내 태양전지 시장이 활성화 될 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Jaffe JE, Zunger A. Theory of the band-gap anomaly in ABC₂ chalcopyrite semiconductors. *Physical Review B* 1984; 29(4): 1882-1906.
- [2] Alberts V. Band gap optimization in Cu(In_{1-x}Ga_x)(Se_{1-y}S_y)₂ by controlled Ga and S incorporation during reaction of Cu-(In,Ga) intermetallics in H₂Se and H₂S. *Thin solid films* 2009; 517: 2115-2120.
- [3] Contreras MA, Ramanathan K, AbuShama J, Hasoon F, Young DL, Egaas B, Noufi R. Diode characteristics in state-of-the-art ZnO/CdS/Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ solar cells. *Progress in photovoltaics: Research and Applications* 2005; 13: 209-216.
- [4] NREL Research Cell Efficiency Records, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [5] 2015년 태양광 산업 동향 Quarterly Briefing, The Export-Import Bank of Korea,
- [6] I. Repins, S. Glynn, J. Duenow, T.J. Coutts, W. Metzger and M.A. Contreras, Required Materials Properties for High-efficiency CIGS Modules, Conference paper, NREL/CP-520-46235 July 2009.
- [7] A. Chifila, 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, Potassium-induced surface modification of Cu(In,Ga)Se₂ thin films for high-efficiency solar cells, *Nature Materials* 2013; 12: 1107-1111
- [8] JY Yang, J.Nam, D. Kim, W. Jo, Y. Kang, D. Lee, Enhancement of the photo conversion efficiencies in Cu(In,Ga)(Se,S)₂ solar cells fabricated by two-step sulfurization process, *Applied Physics Letters* 2015; 107(19) 193901.
- [9] J. Nam, Y. Kang, D. Lee, JY. Yang, YS. Kim, CB. Mo, S. Park, D. Kim, Achievement of 17.9% efficiency in 30×30cm² solar cell sub-modules by sulfurization after selenization with Cd-free buffer, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2016; 24(2): 175-182.