

CIGS 박막태양전지 기술 및 동향

장지성 석사과정, 정중희 교수 (한밭대학교 신소재공학과)

1. 서론

CIGS 태양전지는 박막태양전지 중에서 가장 높은 광전 변환 효율 (소자:22.6%, 모듈:17.0%)을 가지고 있으며 미국기업, 독일기업, 특히 일본기업을 중심으로 하여 산업화가 진행되고 있다. 연간 수 GW의 생산용량에 도달한 회사가 있으며, 연간 100 MW의 생산 규모에 달하는 회사도 다수 존재한다. 2015년도 CIGS 태양광 총 생산 용량은 5.64 GW이며 생산량은 3.71 GW에 이른다. CIGS 태양전지 시장은 2021년 4 B\$ 이상으로 성장할 것으로 예상하고 있다. 현재까지 가장 높은 광전 변환 효율을 보이는 CIGS 셀 구조는 soda-lime glass (SLG) 기판상 “Mo/CIGS/CdS/i-ZnO/ZnO:Al(AZO)”이다 (그림 1). Mo는 후면전극으로 두께는 약 0.5-1 μm 이고, CIGS는 약 2 μm 두께의 광흡수층이다. 버퍼층으로 불리는 CdS층은 CIGS와 p-n 접합을 형성하며 약 50-100 nm의 두께를 가지고 있다. 그리고 이중층 i-ZnO/ZnO:Al 은 상부 투명전극으로 각각의 두께는 약 100 nm, 500 nm 이다. 위에서 언급한 기판 및 다수의 박막층을 포함한 태양전지 소자 구조는 수십 년간의 수많은 연구자들의 노력으로 최적화 된 것이다. 본고에서는 기판을 포함한 각 층의 역할 및 특성에 대해서 논의하고자 한다.

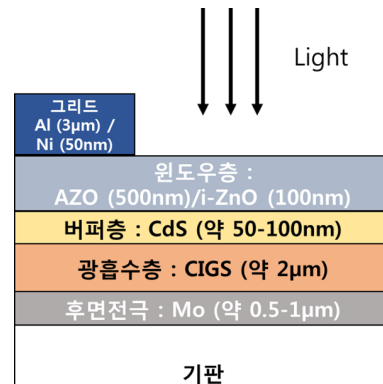


그림 1. 일반적인 CIGS 박막태양전지 구조.

2. 본론

2.1 기판

현재 최고 효율을 보이는 CIGS 태양전지는 SLG 기판을 기반으로 하고 있다. 이 기판이 CIGS 태양전지용으로 널리 사용하는 이유는 다음 2 가지로 요약할 수 있다. 첫 번째로 SLG 기판의 열팽창계수 (coefficient of thermal expansion, CTE)가 $9.2 \times 10^{-6}/\text{k}$ 로 CIGS의 열팽창계수 ($8.32 \times 10^{-6}/\text{k}$)와 매우 유사한 값을 가진다. CIGS보다 열팽창계수가 작은 소재를 기판으로 사용할 경우 공정 후 냉각 과정에서 박막층에 인장 응력이 잔류하게 되고 이

로 인하여 CIGS 박막에 작은 구멍과 균열들이 형성될 수 있다. 반면에 기관의 열팽창계수가 CIGS보다 상대적으로 크면 냉각 과정에서 박막에 압축 응력이 잔류하게 되어 접착 불량(adhesion failures)을 유발할 수 있다 [1]. 따라서 기관의 열팽창계수는 CIGS 태양전지 소재와의 열팽창 계수가 유사한 값을 가져야 한다. 두 번째로는 SLG에 포함된 Na 이온이 Mo 후면전극을 통해 CIGS층으로 확산이 되어 태양전지 특성 향상에 도움을 준다. 확산된 Na 이온은 CIGS 박막의 결정 성장을 촉진 시킴과 동시에 CIGS 박막내의 결함을 치유할 수 있고 또한 홀 농도를 적절한 수준으로 유지시키는 역할을 할 수 있다 [2,3]. 이러한 현상을 바탕으로 하여 Na 및 K 등의 알칼리 금속 원소가 CIGS 태양전지 효율 향상에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 통해 추가적인 태양전지 효율 향상이 기대된다 [4].

최근에 태양전지의 휴대기기 집적화 및 건물 일체형 태양광 발전(Building-Integrated Photovoltaics, BIPV)이 각광을 받고 있다. 휴대용 기기와 건물 외벽에 태양광 모듈을 설치하기 위해서는 가볍고 유연한 기

표 1. CIGS 태양전지에 사용되는 소재의 열팽창 계수 [6].

Material	CTE ($\times 10^{-6}/K$)
Stainless steel	11-16
Soda-lime glass	9
Borosilicate glass	4,6
Polyimide	12-24
Molybdenum	4,8
Cu(In,Ga)Se ₂	8-11
Cds	4,5
ZnO	4,75

관의 사용이 필요하다. 이로 인해 유연기관을 기반으로 하는 플렉서블 태양전지에 관심이 높아지고 있다(그림 2). 유연기관으로는 금속 및 고분자 소재를 주로 사용되고 있다. 금속기관으로는 주로 stainless steel이 사용되고 있으며 고분자 소재로는 polyimide 기관이 주로 사용되고 있다. 금속 소재의 기관의 경우 고온 공정 중 기관 내에 함유된 불순물이 CIGS 층으로 확산되어 태양전지 효율 저하를 유발할 수 있어 불순물 차단을 위한 확산 방지막 형성이 필요하다. 한편 고분자 소재는 CIGS 보다 상대적으로 큰 값의 열팽창계수($12-24 \times 10^{-6}/k$)를 가지고 있어 CIGS 태양광 소재의 박리 현상이 발생할 수 있다. 또

한 열적 안정성이 우수하지 못하여 공정 온도가 제한되는 문제점을 지니고 있다 [5]. 금속 및 고분자 소재의 기관 사용을 통해 우수한 특성을 가진 CIGS 플렉서블 태양전지를 구현을 위해서는 확산 방지막, 잔류 응력 제어 기술, 박막 저온 성장 기술 등에 대한 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

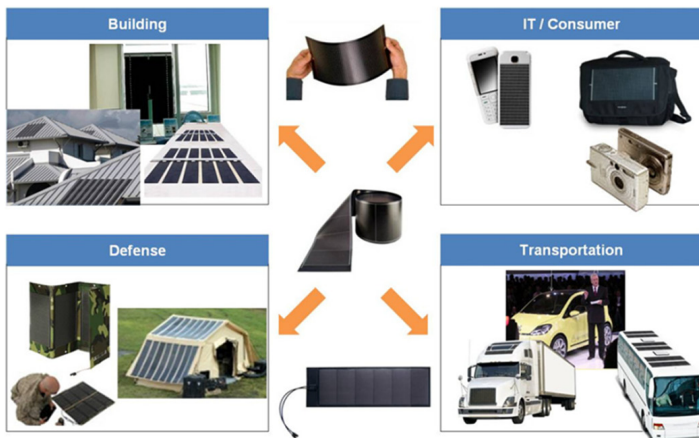


그림 2. 플렉서블 박막태양전지 적용 사례 (출처: 한국에너지기술평가원, “폴리머 기관 CIGS 박막태양전지 모듈 개발” 기획보고서, 2012).

2.2 후면전극

CIGS 태양전지의 후면전극 소재는 다음에 열거한 특성을 만족해야 한다. 첫째, 고온의 Se 분위기에서 안정해야 하며 둘째, 높은 전기 전도도를 가져야 한다. 셋째, 기판과의 접착성이 우수해야 하며 또한 CIGS와의 우수한 Ohmic contact 형성할 수 있어야 한다 [7]. 이러한 특성들을 동시에 만족하는 후면전극 소재를 찾기 위해 Ni, Cu, Au, Pt 등 많은 재료들이 연구되었지만 현재까지는 Mo가 가장 우수한 특성을 보인다.

Mo 박막의 특성은 스퍼터 공정 시 Ar의 압력에 의해 크게 영향을 받는다 (그림 3). Ar 압력이 낮으면 비저항 값은 낮아지지만 잔류 압축 응력의 형성으로 인해 접착력이 떨어져 박리 현상이 일어날 수 있다. 반면 Ar 압력이 높아지면 잔류 인장 응력 형성으로 인하여 기판과의 우수한 접착성을 확보할 수 있지만 비저항 값이 커지는 문제를 가지고 있다 [1,8]. 기판과의 우수한 접착성과 높은 전기 전도 특성을 동시에 만족할 수 있는 Mo 박막을 형성하기 위하여 높은 Ar 압력조건에서 우수한 접착성을 가지도록 한 뒤 낮은 Ar의 압력 조건에서 높은 전기 전도도를 가지도록 한다.

고온 Se 분위기에서 Mo/CIGS 계면에 MoSe₂가 형성되어 우수한 Ohmic contact을 형성하는 것으로 알려져 있다. 얇게 형성된 MoSe₂층은 Schottky contact을 Ohmic contact으로 변환시켜주어 태양전지의 효율 향상에 이바지 한다. 하지만 두꺼운 MoSe₂층

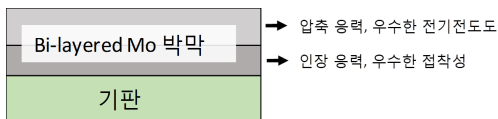


그림 3. Bi-layered Mo 박막 개략도: 하부층은 우수한 접착성을 가지는 스퍼터링 조건 (높은 Ar 압력) 에서 형성하고 상부층은 전기전도도가 우수한 공정조건 (낮은 Ar 압력) 에서 형성한다 [8].

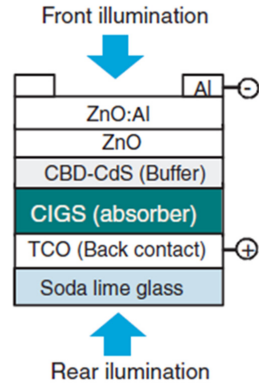


그림 4. 양면형 태양전지 일반적인 구조. 양면형 태양전지는 상하부 모두 투명전극을 적용하여 양면으로 태양광을 흡수하여 발전을 할 수 있다 [10].

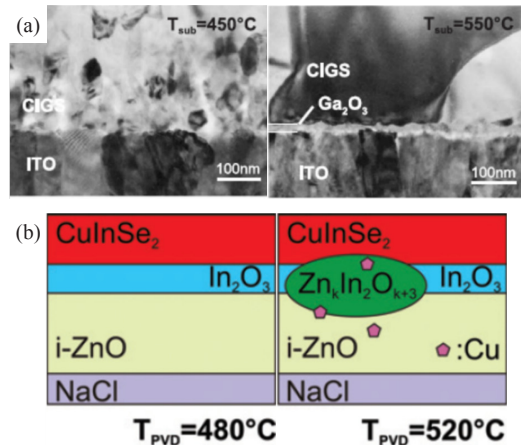


그림 5. 후면 산화물전극/CIGS 계면에서의 이차상 형성. a) ITO/CIGS 계면에서 Ga₂O₃가 형성될 수 있다 [12]. (b) i-ZnO 하부전극과 CIGS층 계면에서 Zn_kIn₂O_{k+3}이 형성될 수 있다 [13].

은 직렬 저항의 증가를 유발하여 태양전지의 성능이 저하될 수 있다 [9].

불투명한 후면전극을 사용하면 지면이나 사물로부터 반사된 태양광의 이용한 발전이 불가능하다. 태양전지의 후면을 통해 입사되는 빛을 추가적으로 이용하기 위하여 상하부 모두 투명전극을 적용한 양면형 (Bifacial) 태양전지 (그림 4)에 대한 연구가 진행되고 있

다 [10,11]. 약 15% 이상의 효율을 가지는 양면형 태양전지가 보고되고 있지만 추가적인 개선이 필요한 상황이다. ITO (indium tin oxide) 후면전극을 적용하는 경우 계면에서 이차상 Ga_2O_3 가 생성되고 ZnO 후면전극을 사용할 경우 이차상 $Zn_kIn_2O_{k+3}$ 산화물이 형성되는 문제점을 가지고 있다 [12,13]. 따라서 후면투명전극/CIGS 계면에서의 이차상 형성 제어를 통해 추가적인 효율 향상을 기대할 수 있다.

2.3 광흡수층

CIGS 광흡수층은 직접 천이용 밴드갭을 가지며 광흡수계수가 $10^5/cm$ 로 매우 높아 수 μm 의 얇은 두께의 흡수층으로도 태양광을 효율적으로 흡수할 수 있으며, In/Ga 조성비 변화를 통해 밴드갭 조절이 매우 용이하다. 이러한 이유로 CIGS는 박막형 태양전지의 광흡수층으로 매우 적합한 소재이다.

CIGS 박막을 형성하는 공정법은 크게 진공 증발법과 Two-step 방법으로 구분할 수 있다. 진공 증발법으로는 3-stage 방식이 널리 사용된다. 이 방식은 첫 번째 단계에서 In, Ga, Se 증발시켜 SLG/Mo에 (In,Ga)Se 전구체를 형성하고 난 후 Cu, Se 원소를 증발시켜 Cu 과잉 분위기에서 결정립이 큰 CIGS 박막을 형성한다. 마지막 단계로 Cu-Se 이차상을 제거하기 위하여 In, Ga, Se 증착 공정을 거쳐 치밀한 CIGS 단일상의 박막을 제조한다 (그림 6). 3-stage 방식은 각각의 증발원을 사용하여 실시간으로 조성 제어 용이하다. 또한 SLG/Mo 위에 증착된

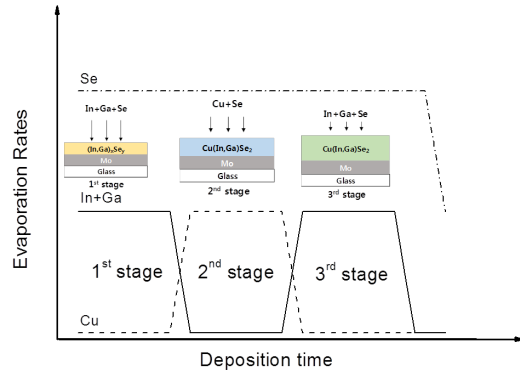


그림 6. 3-stage 공정 개략도. 첫 번째 단계에서 In, Ga, Se 원소를 증발시켜 (In,Ga)Se 전구체 형성 후 두 번째 단계에서 Cu, Se 증발을 통해 Cu 과잉 분위기에서 CIGS 거대 결정립을 형성한다. 마지막 단계에서 Cu-Se 이차상을 제거하기 위해 In, Ga, Se 분위기에서 증착공정을 마무리 한다 [1].

CIGS 박막은 균일하고 완만한 표면을 가진다. 이러한 표면은 버퍼층이 균일하게 증착되도록 하며 후속 투명전극 스퍼터링 공정 시 CIGS층의 손상을 최소화 시킬 수 있다. 하지만 공정 온도가 상대적으로 높기 때문에 기관 선택이 자유롭지 못하고 대면적 증착이 다소 어렵다는 단점을 가지고 있다 [7].

한편 Two-step 공정은 주로 스퍼터링 공정과 Selenization 공정으로 이루어진다

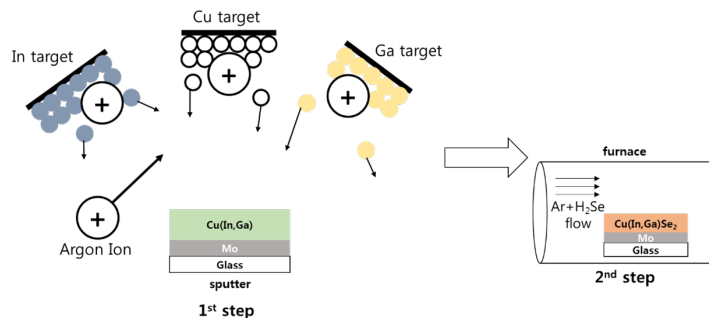


그림 7. Two-step 공정을 통한 CIGS 박막 제작 과정. 스퍼터방식을 이용하여 금속 전구체를 증착한 후 Se 분위기에서 열처리를 통하여 CIGS 박막을 형성한다.

(그림 7). 스퍼터링법을 통해 SLG/Mo위에 Cu(In,Ga) 전구체를 형성한 뒤 Se 분위기에서 열처리 공정을 통해 CIGS 박막을 형성하는 방법이다. 현재까지는 주로 Cu, In, Ga 각 원소의 타겟을 사용하였으며 최근에는 타겟 제작 기술이 발달하여 CIGS 단일 타겟을 이용하여 CIGS 흡수층을 증착하는 연구가 진행 중이다. 스퍼터링 방식은 동시 증발법에 비해 상대적으로 빠른 공정 속도와 대면적 증착에 유리한 장점을 보유하고 있다. 하지만 500℃ 이상의 고온에서 열처리를 진행하기 때문에 기관 선택이 자유롭지 못하며 장시간 열처리를 하게 되면 접착력이 좋지 않고 두꺼운 MoSe₂ 막이 형성되는 문제를 가질 수 있다 [1].

스퍼터링 방식 이외에도 전구체를 형성하는 방법으로 나노입자 용액법 및 전기도금법을 이용한 비진공 방식이 있다. 비진공 방식은 낮은 제조 단가와 짧은 공정 시간의 장점을 가지고 있지만 비진공 방식에서 비롯된 불순물 및 조성분포 제어의 어려움의 문제점을 가지고 있으며 이를 해결하기 위한 연구는 국내외적으로 활발히 진행되고 있다 [14,15].

2.4 버퍼층

CIGS 흡수층과 윈도우층 사이에 버퍼층을 형성하여 태양전지의 효율을 극대화 할 수 있다. 현재 20% 이상의 고효율의 CIGS 태양전지의 버퍼층은 CdS가 주로 사용된다. CdS층은 주로 Chemical Bath Deposition (CBD) 방법으로 형성한다. CBD 방법을 통해 균일한 박막을 형성할 수 있고 CBD 용액의 암모니아는 CIGS 표면에 있는 산화물을 제거하는 역할을 한다 [16]. CdS 버퍼층의 역할은 다음의 세 가지로 요약할 수 있다. 첫 번째, CdS는 CIGS와 격자상수가 비슷하여 우수한 CIGS/CdS p-n 접합을 형성한다. 두 번째, CIGS 광흡수층과 투명전극사이의 밴드 구조를 최적화 하여 계면에서의 재결합을 최소화한다. 세 번째,

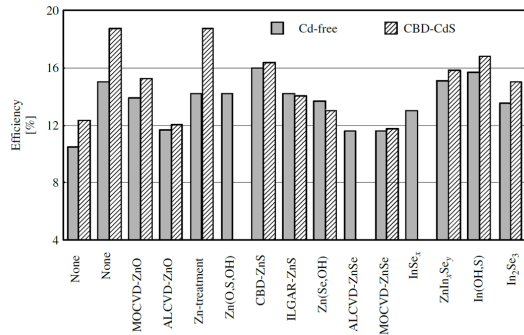


그림 8. 버퍼층 소재에 따른 CIGS 태양전지 효율 비교 [1].

투명전극을 증착하는 공정, 즉 스퍼터링 공정 시 광흡수층을 보호하는 역할을 한다.

CBD-CdS 버퍼층을 적용하여 높은 효율을 가지는 CIGS 태양전지가 보고되고 있지만 친환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 Cd이 없는 버퍼층 소재에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다 (그림 8)[1]. CdS 대체 물질 중 가장 우수한 특성을 보이는 재료는 Zn(O,S)이다. 이 소재를 적용한 태양전지는 CdS 버퍼층을 사용한 태양전지와 매우 비슷한 값의 효율을 가지는 것으로 알려져 있다 [17]. Zn(O,S) 버퍼층 주요 형성법으로는 CBD 법과 atomic layer deposition (ALD) 이다 [18]. 꾸준한 연구를 통해 Zn(O,S) 버퍼층은 CBD-CdS 버퍼층을 대체할 수 있는 수준까지 거의 도달했지만 완벽하게 대체하기 위해서는 특성 제어가 용이하고 대량 생산에 적합한 공정을 찾기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

2.5 윈도우층

CIGS 태양전지의 윈도우층으로 사용되기 위해서는 높은 투과도와 낮은 전기저항을 동시에 만족해야 한다. CIGS 태양전지에 주로 사용되는 윈도우층 투명전극은 스퍼터링 공정법을 통한 i-ZnO/AZO 이다. i-ZnO/AZO 2층 층에서 i-ZnO 층은 Shunt path를 최소화

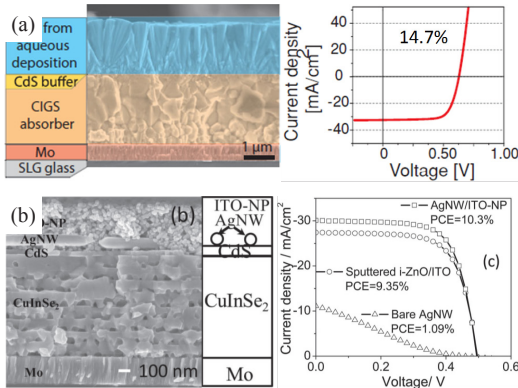


그림 9. (a) 용액공정 AZO박막 투명전극 적용한 CIGS 태양전지 구조 및 특성 [19], (b) 용액공정은 나노와이어-ITO 나노입자 복합체 투명전극을 적용한 CIGS 태양전지 구조 및 특성 [20].

화 시키는 것으로 알려져 있다 [16]. CdS 형성 시 발생할 수 있는 핀 홀을 절연성이 우수한 i-ZnO으로 채워 효율 저하를 최소화 시킬 수 있다. 한편 AZO 박막은 투명전극의 높은 전기 전도도를 제공한다.

높은 투과도와 낮은 전기저항을 동시에 만족하는 투명전극층을 증착하기 위해서 주로 스퍼터링 공정이 사용된다. 공정 및 장비 저가화를 위해 용액 공정을 이용한 투명전극에 대한 연구가 진행되고 있다. 비진공 공정법 ZnO:Al 투명전극 개발과 [19] 은 나노와이어 투명전극 개발 [20]의 크게 2 가지 방향으로 연구가 진행되고 있으며 (그림 9). 스퍼터링 공정에 의한 투명전극과 동등한 수준의 특성을 가지는 것으로 보고되고 있다.

플렉서블 태양전지에 적용하기 위한 목적으로는 유연성이 상대적으로 우수한 은 나노와이어 기반 투명전극이 유리할 것으로 판단된다. 은 나노와이어는 투명전극은 주로 유기 용액에 희석된 상태의 은 나노와이어 용액을 스핀 코팅법 혹은 스프레이 코팅법에 의하여 손쉽게 형성할 수 있다. 용액공정의 은 나노와이어는 메쉬 형태를 하고 있어 투과도가

매우 높고 낮은 전기저항을 가진다. 은 나노와이어를 투명전극층으로 사용한 태양전지의 효율은 스퍼터링법으로 형성한 투명전극을 지닌 태양전지보다 매우 낮은 효율을 가지는 반면 나노와이어-금속산화물 복합체 투명전극을 적용한 태양전지는 종래 구조의 태양전지와 동등하거나 오히려 우수한 특성을 보였다 [20]. 은 나노와이어는 넓은 영역에서의 높은 전기 전도도를 제공하고 금속산화물은 은 나노와이어-은 나노와이어 사이에서의 좁은 공간에서 전하 이동의 매개체 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

3. 맺음말

본고에서는 CIGS 박막태양전지 각 층의 역할과 고효율 태양전지를 제작하기 위한 공정 요구조건에 대해 논의하였다. CIGS 박막태양전지는 비용, 품질 및 신뢰성 측면에서 볼 때 결정질 실리콘 태양전지와 경쟁할 수 있는 유일한 박막태양전지로 평가 받는다. 또한 대량생산 및 유연기관 적용 가능성으로 볼 때 모든 태양광 기술 중 가장 유망한 기술이 될 것으로 예측 된다. 결정질 실리콘 태양전지를 뛰어넘기 위해서는 소재의 특성 및 공정 개선을 위한 끊임없는 연구가 필요하다. 또한 소면적 소자의 효율은 22% 이상의 높은 효율을 기록하고 있지만 소면적 소자기술을 대면적의 모듈에 적용 하게 되면 효율 저하를 피할 수 없다. CIGS 태양전지의 시장확대를 위해서는 소면적 소자에 적용되는 소재 및 공정 개선뿐 아니라 대면적 모듈에 적용했을 때 효율 저하를 최소화 시킬 수 있는 연구가 매우 절실한 상황이다. CIGS 박막태양전지는 향후 유연성, 경량성을 겸비한 유연기관을 기반으로 한 BIPV 혹은 다양한 분야에 접목하여 융합형 에너지로 발전할 수 있어 새로운 태양광 시장의 창출이 가능할 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] Antonio, Luque, and Steven, Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering : Chapter 13 Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells.", Wiley, (2010).
- [2] 윤경훈, "CIS 화합물 박막 태양전지 기술 개발". 한국에너지기술연구원, 대전, pp. 1-96 (2006).
- [3] Dominik Rudmann, "Effects of sodium on growth and properties of Cu(In,Ga)Se₂ thin films and solar cells." ETH Nr. 15 576.
- [4] D.H. Shin, J.Y. Kim, T. Gershon, R. Mankad, M. Hopstaken, S. Guha, B.T. Ahn, B.H. Shin, "Effect of the incorporation of alkali elements on Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells.", Solar Energy Materials & Solar Cells 157:695-702 (2016).
- [5] 정용덕, 신명훈, "플렉시블 CIGS 태양전지 기술 동향", 태양광발전학회, 1(1), pp. 24-33 (2015).
- [6] David Julien Louis Bremaud, "Investigation and Development of CIGS Solar Cells on Flexible Substrates and with Alternative Electrical Back Contacts.", Ph. D. Sciences, ETH ZURICH, Feusisberg SZ, Switzerland (2009).
- [7] A. Romeo, M. Terheggen, D. Abou-Ras, D. L. Batzner, F.-J. Haug, M. Kalin, D. Rudmann, A. N. Tiwari, "Development of Thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe Solar Cells.", Prog. Photovolt. 12:93-111 (2004).
- [8] John H. Scofield, A. Duda, D. Albin, B.L. Ballard, P.K. Predecki, "Sputtered molybdenum bilayer back contact for copper indium diselenide-based polycrystalline thin-film solar cells.", Thin Solid Films 260:26-31 (1995).
- [9] T. Wada, N. Kohara, S. Nishiwaki, T. Negami, "Characterization of the Cu(In,Ga)Se₂/Mo interface in CIGS solar cells.", Thin Solid films 387:118-122 (2001).
- [10] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, T. Mise, "Novel device structure for Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts.", Solar Energy 77:739-747 (2004).
- [11] S.H. Moon, S.J.Park, Y.J. Hwang, D.K. Lee, Y.A. Cho, D.W. Kim, B.K. Min, "Printable, wide band-gap chalcopyrite thin films for power generating window applications.", Scientific reports 4:4408 (2014).
- [12] T. Nakada, "Microstructural and diffusion properties of CIGS thin film solar cells fabricated using transparent conducting oxide back contacts.", Thin Solid Films 480-481:419-425 (2005).
- [13] B. Hoepfner, A. Steigert, I. Lauermann, M.CH. Lux-Steiner, "Transparent back contacts for chalcopyrites: Temperature dependency of Cu diffusion into i-ZnO substrates.", EPL 109:28004 p1-5 (2015).
- [14] C.H. Chung, K.H. Hong, D.K. Lee, J.H. Yun, Y. Yang, "Ordered Vacancy Compound Formation by Controlling Element Redistribution in Molecular-Level Precursor Solution Processed CuInSe₂ Thin Films.", Chem. Mater. 25:7244-7247 (2015).
- [15] H.N. Lee, W.J. Lee, J.Y. Kim, M.J. Ko, K.K. Kim, K.W. Seo, D.K. Lee, H.G. Kim, "Highly dense and crystalline CuInSe₂ thin films prepared by single bath electrochemical deposition.", Electrochimica Acta 87:450-456 (2013).
- [16] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bucheler, A. Ennaoui, C.-H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Bjorkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, T. Tomdahl, "Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments.", Prog. Photovolt. 18:411-433 (2010).
- [17] D. Hariskos, R. Menner, P. Jackson, S.Paetel, W. Witte, W. Wischmann, M. Powalla, L. Burkert, T. Kolb, M. Oertel, B. Dimmler, B. Fuchs, "New reaction kinetics for a high-rate chemical bath deposition of the Zn(S,O) Buffer layer for Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells.", Prog. Photovolt. 20:534-542 (2012).
- [18] Taizo Kobayashi, Toyokazu Kumazawa, Zacharie Jehl Li Kao, Tokio Nakada, "Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells with a combined ALD-Zn(O,S) buffer and MOCVD-ZnO:B window layers.", Solar Energy Materials & Solar Cells 119:129-133 (2013).
- [19] H. Hagedorfer, K. Lienau, S. Nishiwaki, C. M. Fella, L. Kranz, A. R. Uhl, D. Jaeger, L. Luo, C. Gretener, S. Buecheler, Y.

E. Romanyuk, A. N. Tiwari, "Highly Transparent and Conductive ZnO:Al Thin Films from a Low Temperature Aqueous Solution Approach.", *Adv. Mater.* 26:632-636 (2014).

- [20] C.H. Chung, T.B. Song, B. Bob, R. Zhu, H.S. Duan, Y. Yang, "Silver Nanowire Composite Window Layers for Fully Solution-Deposited Thin-Film Photovoltaic Devices.", *Adv. Mater.* 24:5499-5504 (2012).

저자약력



성명 : 장지성

◆ 학력

- 2016년
한밭대학교 공과대학
신소재공학과 공학사
- 현재
한밭대학교 대학원
신소재공학과 석사과정



성명 : 정중희

◆ 학력

- 1997년
서울대학교 공과대학
무기재료공학과 공학사
- 1999년
서울대학교 대학원
무기재료공학과 공학석사
- 2012년
UCLA(미) 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1999년 - 2001년 SK Hynix 연구원
- 2001년 - 2013년 ETRI 연구원/선임연구원
- 2013년 - 현재 한밭대학교 신소재공학과 조교수