화합물 박막 태양전지

DOI: 10.3938/PhiT.28.017

Compound Thin-Film Solar Cells

Jihye GWAK

Solar cells are generally classified into three different generations: 1st generation solar cells, which are the crystalline silicon solar cells that are already commercially available and have the highest market share; 2nd generation solar cells, which are at an early stage of market entry; and 3rd generation solar cells for which researchers theoretically expect high performance but have not realized a breakthrough yet. Typical 2nd generation solar cells are thin-film solar cells whose absorber layers are very thin compared with those layers in the 1st generation solar cells; these are promising in terms of their production cost thanks to the low consumption of absorber materials and their less-complicated fabrication process. $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) compound thin-film solar cells exhibiting a record efficiency of 23.35% in the laboratory have attracted interest from many research groups and industries worldwide as the CIGS absorber material can produce a high conversion efficiency without material degradation for widely used electricity generation. Further, light CIGS modules fabricated on flexible substrates can be easily applied with different designs and shapes while conventional crystalline Si solar modules do not have such advantages for building-integrated photovoltaics (BIPV) adaptability because of weight and shape restrictions due to the rigid Si-wafer substrates. A general

곽 지 혜

introduction to compound thin-film solar cells will be provided in this paper. Information on CIGS thin-film solar cells will be given in detail.

들어가는 글

박막 태양전지는 실리콘 웨이퍼 기판 상에 제조되는 결정질 실리콘 태양전지와 달리, 유리, 금속, 플라스틱 등 다양한 기판 상에 얇은 두께의 광흡수층만으로도 충분히 빛을 흡수할 수 있도록 높은 광흡수계수의 반도체 재료를 사용하여 수 마이크로미터 이내의 박막을 증착하여 만들어진다. 박막 태양전지는 광흡수층 재료 소모가 적고, 실리콘 잉곳으로부터 웨이퍼 제조나 셀 연결을 통한 모듈화 등의 공정을 거치지 않는 간소한 공정을 통해 제조원가 절감을 기대할 수 있으므로 연구개발 대상으로 주목받아왔다.

이중 특히 주기율표 상의 II-VI족(예: cadmium telluride, CdTe), I-III-VI족(예: copper indium gallium diselenide, CIGS), I-II-IV-VI족(예: copper zinc tin sulfide, CZTS), III-V족(예: gallium arsenide, GaAs) 등의 화합물 반도체를 광흡수층으로 사용하여 만들어지는 태양전지를 화합물 박막 태양전지라고 일컫는다(그림 1).

화합물 박막 태양전지는 표 1에 정리한 바와 같이 광흡수층 소재에 따라 그 제조방법과 특성이 크게 다르므로, 본 글에서는 환경·경제성·응용성 등의 측면에서 가장 큰 장점을 갖는 CIGS 화합물 박막 태양전지에 대해 주로 다루기로 한다.

CIGS 박막 태양전지

1. CIGS 박막 태양전지의 특징

그림 2와 같은 찰코피라이이트(chalcopyrite) 구조를 갖는 직접전이형 I-III-VI족 화합물을 광흡수층으로 하는 CIGS 박막 태양전지는 밴드갭(E_g) 1 eV의 CuInSe_2 (CIS) 화합물 반도체에 Ga를 도핑하여 특성을 개선한 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) 광흡수층을 사용한다. Ga 도핑량 변화만으로도 CIGS 화합물의 밴드갭

저자약력

곽지혜 박사는 이화여자대학교 화학과에서 학사와 석사를 마친 후, 삼성종합기술원 전자방출원연구단에서 2년간 근무했다. 몽펠리에 제2대학교 및 유럽멜브레인연구소(IEM-UMII, CNRS, ENSCM)에서 프랑스 정부장학생으로 박사학위를 취득하였으며, 일본 물질재료연구기구(NIMS) 환경재료연구센터에서 일본학술진흥회(JSPS) 박사후연구원으로 2년간 근무했다. 현재 한국에너지기술연구원 태양광연구실에서 책임연구원으로 재직 중이며, 2017년부터 실장을 맡고 있다.(bleucoeur@kier.re.kr)

Fig. 1. Elements for absorbers of compound thin film solar cells.^[1]

Table 1. Properties of compound thin film solar cells.^[2,3]

광흡수층 종류	효율	가격	응용성	장 점	단 점	단일접합 소면적 셀 최고효율 @면적	최고효율 보유기관
GaAs	◎	×	△	초고효율, 고안정성, 다중접합 및 집광가능	고가, 공정복잡, Ga 및 As 부존량	29.1% @0.998 cm ²	Alta devices
Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂	○	○	◎	고효율, 고안정성, 경량, 유연성, 다중접합 가능	다원계 화합물로 대면적화 기술 필요, In 및 Ga 부존량	23.35% @~1.0 cm ²	Solar Frontier
CdTe	○	◎	△	비교적 고효율, 저가, 경량	Cd 독성, Te 부존량	22.1% @0.4798 cm ²	First Solar
Cu ₂ ZnSn(S _{1-y} Se _y) ₄	△	◎	◎	범용원소, 경량, 저가, 유연성	불순물 제어기술 필요, 저효율	12.6% @0.4804 cm ²	DGIST
Cu ₂ O, Cu ₂ S, FeS ₂ , SnS 등 범용원소 기반 이원계 화합물	×	◎	◎	범용원소, 저가	극도의 낮은 효율	≪ 10%	여러 기관

은 1.0에서 1.6 eV까지 조절될 수 있으며, I족 원소로 Cu 대신 Ag를, III족 원소로 Al을, VI족 원소로 S나 Te를 사용하거나 도핑할 수 있기 때문에 동일한 밴드갭을 가진 광흡수층이라도 원소를 달리하여 막의 품질을 향상시키거나, 밴드갭을 다양하게 조절하여 동종의 다중접합 태양전지 개발을 통한 고효율화도 기대할 수 있다.^[1,4-7]

CIGS 화합물은 Si에 비해 10배 이상 큰 광흡수계수를 가지므로 그림 3과 같이 소량의 재료만을 사용하여 2 μm 내외의 두께로 제조하여도 충분한 광흡수가 가능하다.^[4] 비교적 저온 (350 ~ 550°C)에서 막을 형성할 수 있고, 소다석회 유리 등의 저가 기판뿐만 아니라 금속이나 플라스틱 등 다양한 기판을 사용할 수 있어 그 응용성이 크다. 다결정 박막 태양전지 중에서는 변환효율이 가장 높아, 소면적 셀에서 23.35%의 효율이

REFERENCES

- [1] Jae Ho Yun, Phys. High Technol. **17**(7/8), 20 (2008).
- [2] M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita and A. W. Y. Ho-Baillie, Prog. Photovolt. Res. Appl. **27**, 565 (2019).
- [3] Solar Frontier Achieves World Record Thin-Film Solar Cell Efficiency of 23.35%, http://www.solar-frontier.com/eng/news/2019/0117_press.html, Jan. (2019).
- [4] H.-W. Schock and R. Noufi, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8**, 151 (2000).
- [5] T. D. Lee and A. U. Ebong, Renewable and Sustainable Energy Review **70**, 1286 (2017).
- [6] J. Ramanujam and U. P. Singh, Energy Environ. Sci. **10**, 1306 (2017).
- [7] K. Kim, S. K. Ahn, J. H. Choi, J. Yoo, Y. J. Eo, J. S. Cho, A. Cho, J. Gwak, S. Song, D. H. Cho, Y. D. Chung and J. H. Yun, Nano Energy **48**, 345 (2018).

Fig. 2. CIGS (chalcopyrite) unit cell. (red: Cu; yellow: Se; blue: In/Ga) (Ref: https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_indium_gallium_selenide)

Fig. 3. Element material consumption for a CIGS absorber in a 3 kW module with 15% efficiency while Si source is consumed more than 15 kg for the same capacity. (photo taken in Prof. Niki's laboratory in AIST, Japan)

달성되었으며 유연기판 상에서도 20.8%의 높은 효율을 보인다.^[8,9] 물리적·화학적 내구성 및 장기안정성을 가질 뿐만 아니라, 실리콘 태양전지보다 내열특성이 좋으므로 같은 효율의 모듈을 설치하여 사용할 때 지역에 따라 연간 발전량 면에서 이로울 수 있다.^[10] 반면, 4성분 이상의 다원계 화합물 제조에 있어 정밀한 조성제어가 필요하여 Si 태양전지에 비해 대면적 모듈의 균일도 확보가 상대적으로 용이하지 않다는 단점을 갖는다.

2. CIGS 박막 태양전지 소자의 구조 및 제조방법

CIGS 박막 태양전지 소자는 그림 4와 같이 기판 위에 후면 전극을 올린 후, CIGS 광흡수층, 완충층(buffer layer), 창층(상부전극; window layer), 금속전극 순서로 형성시킨다. 기판으로는 소다석회유리와 같은 딱딱한(rigid) 기판뿐만 아니라 금속 호일이나 고분자 플라스틱과 같은 유연(flexible) 기판도 사용이 가능하다. 전형적인 후면전극으로는 몰리브덴(Mo) 금속을 증착하여 사용하나, 투광형 소자를 위해서는 ITO 등과 같은 투명전도성 막도 후면전극으로 사용된다. 완충층은 전통적으로는 황화카드뮴(CdS)을 사용해 왔으나, 친환경성을 극대화하기 위

Fig. 4. Schematic structure of CIGS thin films solar cells (left) and cross-sectional SEM image of the cell (right).

해 아연 산화화물($\text{ZnO}_{1-y}\text{S}_y$) 기반의 소재가 주로 사용된다. 창층으로는 대개 알루미늄이나 보론 등이 도핑된 산화아연(ZnO) 기반의 물질이 사용되며, 이외에도 광흡수층과의 계면특성을 개선하여 소자 특성을 높이기 위해 완충층 및 창층의 재료 및 조합이 다양하게 연구되고 있다.

일반적으로 후면전극은 스퍼터링 증착법, CIGS 층은 3단계 동시진공증발증착법이나 2단계 셀렌화 방법(스퍼터링 등으로 전구체 생성 후 셀렌화 열처리), 완충층은 용액성장법, 창층은 스퍼터링이나 화학기상증착법 등을 통해, 표 2에 정리된 바와 같이 각 단위박막의 특성 및 소자의 효율을 극대화하는 방향으로 공정을 제어하면서 형성시킨다. 최종적으로 전류를 모으기 위한 금속전극은 주로 Al/Ni 등을 진공증발방식으로 증착하여 올리는데, 여기에 MgF_2 를 증착하여 반사방지를 통한 효율 향상을 꾀할 수 있다.^[3,5,6,11]

CIGS 박막 태양전지 소자를 모듈화할 때에는 결정질 실리콘 태양광 모듈처럼 여러 개의 개별 셀들을 제조한 후 금속 전극 간 연결(interconnection)을 통해 모듈화하는 것도 가능하지만, 단일집적(monolithic integration) 방식을 통해 공정이 간소화될 수 있다는 차별화된 장점을 갖는다. 그림 5에 나타난 바와 같이 각 단위박막의 증착공정 중 후면전극 분리(P1), 광흡수층 분리(P2), 상부전극(창층) 분리(P3)의 3차 패터닝을 통해 개별 셀 간 연결 없이 소자의 크기나 모양에 구애받지 않고 모듈을 완성할 수 있으며, 이때 패터닝은 레이저 및 물리적 스크라이빙(laser scribing & mechanical scribing)을 통해 이

REFERENCES

- [8] T. Kato, J.-L. Wu, Y. Hirai, H. Sugimoto and V. Bermudez, *IEEE J. Photovoltaics* **9**, 325 (2019).
- [9] R. Carron, S. Nishiwaki, T. Feurer, R. Hertwig, E. Avancini, J. Löckinger, S.-C. Yang, S. Buecheler and A. N. Tiwari, *Adv. Energy Mater.* 1900408 (2019).
- [10] W. Luboń, G. Peřka, K. Marszałek and A. Mařek, *Ecol. Chem. Eng. S.* **24**, 539 (2017).
- [11] Takahiro Wada, *Recent Development of Thin Film Compound Semiconductor Photovoltaic Cells*, ISBN978-4-88231-686-2, 30 June (CMC 출판, 2007).

Table 2. Fabrication processes and parameters for CIGS thin film solar cells.

Thickness, Materials	Process	Parameters
3 μm , Al / 50 nm, Ni	E-beam evaporation	• Thickness
100 nm, MgF_2	E-beam evaporation	• Thickness
< 500 nm, n-AZO / 50 nm, i-ZnO (BZO, GZO, ITO etc)	RF sputtering MOCVD	• Transmittance/Resistance
< 60 nm, CdS (Cd-free $\text{Zn}(\text{O},\text{S},\text{OH})_x$, $\text{In}(\text{OH})\text{S}$, etc)	CBD	• Thickness
< 3 μm $\text{Cu}(\text{In},\text{Al},\text{Ga})(\text{Se},\text{S})$ (Wide bandgap, CZTS, etc)	Co-evaporation or Sputtering or non-vacuum process + selenization	• Grain size : sub. temperature, Cu-binary phase • Band-gap energy : Ga/III • Band-gap engineering : Ga grading • Crystallinity : Se flux, precursor, Mo • Doping : Cu/III • Na concentration and alkali metal doping • MoSe_2 • Defect • Thickness
< 1 μm , Mo	DC sputtering	• Adhesion/Resistivity
< 2–3 mm, SLG (STS, Ti, Polyimide)	Cleaning	• Thermal stability

Fig. 5. Monolithic integration for CIGS thin film solar cell module.

루어진다. 모듈의 성능은 증착된 단위박막의 품질뿐만 아니라 패터닝의 공정 조건 및 간격, 가공기술 등에 따라 크게 좌우된다.^[11]

3. CIGS 박막 태양전지의 고효율화

CIS 태양전지는 1974년 미국 벨 연구소에서 12% 변환효율을 보이며 처음 발명된 이래, 다양한 방법론을 통해 꾸준히 개선되어 3단계 동시진공증발공정으로 증착된 단일접합 광흡수층을 기판으로 23% 이상의 변환효율을 달성하기에 이르렀다. 기판으로 소다석회 유리를 사용할 때 광흡수층을 증착하는 과정에서 기판온도를 유리의 한계점에 가까운 550°C까지 높이면 유리기판으로부터 나온 Na이 후면전극을 통과하여 CIGS 박막 내에 확산되어 광흡수층 결함에 작용함으로써 소자 특성에 큰

Fig. 6. Bandgap profile for CIGS thin film solar cells : normal (left); single graded (center); double graded (right).^[11]

정적 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 현재 고효율화를 도모하는 연구그룹들은 상기 도핑 효과를 극대화하기 위해 Na뿐만 아니라 K, Cs, Rb 등 알칼리 금속을 광흡수층 성막 직후 후열처리 방식으로 증착(post deposition treatment; PDT)하여 최고효율을 향한 최적조건의 광흡수층 제조를 꾀한다.^[8,12,13]

또한, CIGS 박막의 깊이 방향으로 In과 Ga의 조성비 구배를 형성하여 밴드갭 분포를 제어함으로써 효율향상 효과를 볼 수 있다. 후면 Mo 측에서 Ga 조성비가 높고 CIGS 표면쪽으로 갈수록 Ga 조성비가 낮아지도록 조성비 구배를 주게 되면

REFERENCES

- [12] A. Chirila, 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).
- [13] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte and M. Powalla, Phys. Status Solidi RRL **10**, 583 (2016).

Fig. 7. Global PV market: PV production by technology (percentage of global annual production) (top-left); Price learning curve by technology (cumulative production up to Q4, 2017) (top-right); Market share of thin-film technologies (percentage of total global PV production) (bottom-left); Thin film technologies (annual global PV module production) (bottom-right) ©Fraunhofer ISE.^[14]

박막 내 밴드갭은 그림 6(중앙)에 나타난 바와 같이 single grading의 분포를 갖게 되는데, 내부전계가 발생하여 광여기된 전자가 후면의 Mo 측으로부터 p-n 접합의 CIGS 계면으로 이동하게 되므로 전자수집효율이 향상된다. 이러한 single grading 분포에서 표면의 Ga 조성비를 약간 높여 박막 내 밴드갭 분포가 V형이 되도록 그림 6(우측)에서와 같이 double grading을 만들어 주면, 광흡수층 표면의 밴드갭이 넓어짐에 따라 공핍층 내의 재결합이 감소하고 개방전압(V_{oc})이 커지면서 효율향상에 더 큰 효과를 볼 수 있다.^[11]

상기 언급한 CIGS 광흡수층 고품위화와 더불어 태양전지 소자의 고효율화는 밴드 다이어그램의 적절한 설계를 통한 광전류 증대 및 암전류 저감을 통해 이루어진다. CIGS 박막 태양전지 구조에서는, 창층/완충층/광흡수층 사이의 계면이 태양전지 특성을 좌우하므로 매우 중요한데, 특히 완충층과 광흡수층 간 계면이 캐리어의 재결합에 관계한다. 소자의 n층으로부터 주입된 전자와 p층으로부터 주입된 정공이 동시에 계면에 존재할 때 재결합이 일어나는데, 고효율을 보이는 CIGS 박막의 표면에서는 OVC(Ordered Vacancy Chalcopyrite)라고 불리는 In 과잉의 Cu-In-Ga-Se 화합물이 생성되어 계면의 가전자대 오프셋(Valence Band Offset, VBO)에 의해 정공주입을 막고 재결합을 감소시킨다. 완충층으로 CdS를 사용하면, Cd 확산에 의해 광흡수층 표면이 n형화하여 빛에 의해 생성된 전자가 계면에서 재결합하는 속도를 줄여주는 효과도 있으므로, 고

효율 소자의 경우 계면에서의 재결합이 아닌 공핍층에서의 재결합이 주요 재결합의 원인이 된다. CIGS 소자의 밴드 다이어그램에서 전도대 오프셋(Conduction Band Offset, CBO)이 +값으로 커지면(CIGS보다 창층의 전도대가 높으면) 광생성 전자에 대한 장벽이 높아져 단락전류밀도(J_{sc})가 감소하고, -값으로 낮아지면(창층의 전도대가 낮으면) 창층/광흡수층 계면에서의 결함을 매개로 주입된 전자와 정공이 재결합을 일으켜 암전류가 증가하므로 V_{oc} 와 충전률(FF)이 현저하게 저하된다. 이러한 CIGS 소자의 밴드갭 다이어그램에 기반하여, 광흡수층, 완충층, 창층 등 단위박막 소재의 선택 및 합성, 조합 및 공정 제어를 통해 CIGS 박막 태양전지의 고효율화를 설계·도모할 수 있다.^[5,6,11]

박막 태양전지 시장 및 응용성

과거 유럽을 중심으로 급속히 성장해 온 태양광 시장에서 박막 태양전지의 시장 점유율은 소재 및 공정면에서 단가절감의 잠재력을 기반으로 성장세를 보이다 중국이 태양광 시장에

REFERENCES

- [14] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, "Photovoltaics Report", <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, Mar. (2019).

Table 3. BIPV top players.^[16]

Manufacturer	BIPV @2017, Mil. USD		Total @2017, Mil. USD	
	Revenue	Gross Margin	Revenue	Gross Margin
First Solar (미국)	645	161	3,029	199
*Yingli Solar (중국)	453	68	836	-168
Sharp (일본)	524	104	2,528	25
Solar Frontier (일본)	430	77	2,045	78
Sun Power (미국)	464	84	1,987	-1,018
Hanwha Solar (한국)	356	57	804	23
Kyocera (일본)	232	42	1,422	104

*Yingli Solar는 2016년 기준

Table 4. Efficiency comparison of solar cells.^[2,19]

종 류	단결정 Si	다결정 Si	CIGS	Perovskite	CIGS/Perovskite tandem
태양전지 효율	26.7% @79 cm ²	22.3% @4 cm ²	23.35% @1 cm ²	20.9% @1 cm ²	24.6% @0.5cm ²
모듈 효율	24.4% @13177 cm ²	19.9% @15143 cm ²	19.2% @841 cm ²	11.6% @802 cm ²	-

뛰어들어 결정질 실리콘 태양광 모듈의 저가 물량공세를 벌이기 시작한 10여 년 전부터는 기존의 모듈 가격이 급격히 하락함에 따라 박막 태양전지 설치량의 꾸준한 증가에도 불구하고 그 시장점유율은 감소하는 경향을 보여왔다. 반면, 최근 원거리에서 전력을 생산하여 도심으로 전송하는 공급위주의 에너지 사용 방식이 가지는 기술적·사회적 문제가 야기됨에 따라 분산발전의 필요성과 더불어 도시형 태양광 기술이 주목받게 되었는데, 낮은 박막 태양전지 시장점유율에도 불구하고 다른 박막 모듈에 비해 CIGS 박막 태양광 모듈 설치량이 증가추세에 있음은 이와 무관하지 않다.^[14](그림 7)

실제 CIGS 박막 태양전지 기술은 앞서 언급한 경량화나 고내구성·고안정성의 장점 이외에도 공정 시 후면전극으로 주로 사용되는 불투명한 Mo 막을 투명전극으로 대체하여 투광형 모듈도 구현할 수 있으며, 다양한 색상을 가미하여 심미성을 높일 수 있어 건물일체형 태양광(building-integrated photovoltaics, BIPV) 혹은 기기일체형 태양광(device-integrated photovoltaics, DIPV) 모듈에도 유용하다.^[15] 태양광 모듈 생산량 상위 10위권 내에는 95% 이상의 시장점유율을 차지하는 결정질 태양광 모듈 업체들만 포진해 있는 반면, 고부가가치 상품인 BIPV 모듈 판매수익에 있어서는 박막 태양전지 업체들이 선전하고 있음은 시사하는 바가 크다.^[16](표 3)

더불어, CIGS 박막 태양전지는 특수한 처리 없이도 내방사

선 특성이 우수하므로 경량 기판을 기반으로 높은 무게당 전력비 특성을 만족하는 우주비행체용 모듈 개발에도 활용되며,^[17] 안정성 및 소재면에서 아직 기술성 속도는 낮으나 급속한 고효율 갱신으로 주목받고 있는 페로브스카이트 태양전지와도 접목 가능하므로 유연기판 상 다중접합 태양전지 구현을 통해 저가 고효율화 및 응용성의 확장을 기대할 수 있다.^[18,19](표 4)

마치는 글

재생에너지는 미래 에너지믹스의 주축으로써 다양한 보급 환경에 최적화된 기술이 확보되어야 하며, 특히 생활밀착형 분산에너지원에 적용가능한 혁신적 기술이 필요하다. BIPV와 같은 도시형 태양광 발전시스템이 그 좋은 예라고 할 수 있으며 기존의 태양광발전에도 요구되는 높은

변환효율뿐만 아니라 건축자재로서 필요한 내구성, 무게, 디자인적인 요소 등이 고려되어야 소비자의 선택을 받을 수 있다. 도로나 자동차, 휴대기기 등에 일체화된 태양광시스템도 분산 에너지원으로서 좋은 시도가 될 수 있으며, 이에 CIGS 박막 태양전지와 같이 고효율·고안정성을 가지며 경량화 및 다기능화가 가능한 화합물 박막 태양전지 기술이 활용도 및 잠재력이 크다. 태양광 시장의 경기침체에도 불구하고, 미래 가치의 실현을 위해서는 이러한 차세대 기술에 대해 지속적인 투자와 연구개발이 필수불가결함을 유념해야 할 것이다.

REFERENCES

- [15] M. Saifullah, J. Gwak and J. H. Yun, J. Mater. Chem. A **4**, 8512 (2016).
- [16] Z. Ning and X. Yongfei, *Global Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Market Research Report 2017*, Oct. (QYResearch, 2017).
- [17] K. Otte, L. Makhova, A. Braun and I. Konovalov, Thin Solid Films **511-512**, 613 (2006).
- [18] Q. Han, Y.-T. Hsieh, L. Meng, J.-L. Wu, P. Sun, E.-P. Yao, S.-Y. Chang, S.-H. Bae, T. Kato, V. Bermudez and Y. Yang, Science **361**, 904 (2018).
- [19] Perovskite/CIGS tandem cell with Record Efficiency of 24.6% Paves the Way for Flexible Solar Cells and High-Efficiency Building Integrated PV, <https://www.imec-int.com/en/articles/perovskite-cigs-tandem-cell-with-record-efficiency-of-24-6-percent>, Sep. (2018).