

## 2-Terminal Perovskite/SHJ 탠덤 태양전지 기술 검토

장민규<sup>1)</sup> · 전영우<sup>1)</sup> · 김민제<sup>1)</sup> · 이준신<sup>2)</sup> · 박진주<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>에너지융합학과, 청주대학교, 청주, 28497

<sup>2)</sup>정보통신공학부, 성균관대학교, 수원, 16419

## Review of 2-terminal Perovskite/SHJ Tandem Junction Solar Cell Technology

Minkyu Jang<sup>1)</sup> · Youngwoo Jeon<sup>1)</sup> · Minje Kim<sup>1)</sup> · Junsin Yi<sup>2)</sup> · Jinjoo Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Energy Convergence, Cheongju University, Cheongju, 28497, Korea

<sup>2)</sup>College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

Received September 8, 2020; Revised September 19, 2020; Accepted September 20, 2020

**ABSTRACT:** c-Si solar cells currently account for more than 90% of the solar energy market. Research on tandem junction solar cells to overcome efficiency limitations is drawing attention at a time when new technologies are being developed to secure the price competitiveness of silicon solar cells. Among several candidate materials for silicon-based tandem solar cells, perovskite has recently been studied as it is suitable for the ease of process as well as for its properties as a tandem solar cell material. In this study, we want to review the research trends and technology limitations of 2-T Perovskite/SHJ tandem junction solar cells.

**Key words:** 2-Terminal, Tandem junction, Solar cell, Perovskite/Silicon

### Nomenclature

$V_{oc}$  : open circuit voltage, V

$J_{sc}$  : short circuit current density, mA/cm<sup>2</sup>

FF : fill factor, %

PCE : power conversion efficiency, %

c-Si : crystalline-silicon

PSC : perovskite solar cell

2-T : 2-terminal or monolithic

4-T : 4-terminal

TCO : transparent conductive oxide

HTL : hole transporting layer

ETL : electron transporting layer

NIR : near infrared radiation

ZTO : zinc tin oxide

MoO<sub>3</sub> : molybdenum oxide

LiF : lithium fluoride

PEIE : polyethyleneimines

PCBM : [6,6]-phenyl-c61 butyric acid methyl ester

PDMS : polydimethylsiloxane

poly-TPD : poly[bis(4-butypheny)-bis(phenyl)benzidine]

NiO : nickel oxide

TiO<sub>2</sub> : titanium dioxide

BCP : bathocuproine

C<sub>60</sub> : fullerene

FA : formamidinium

MA : methylammonium

BBr<sub>3</sub> : boron tribromide

### Subscript

ITO : indium doped tin oxide

IZO : indium zinc oxide

### 1. 서론

현재 전 세계적으로 탄소중립 문제를 해결하기 위해 다양한 분야에서 연구 중이다. 그중에서 태양광 기술은 화석 연료, 원자력의 단점을 보완할 수 있는 에너지로 주목받고 있다. 태양전지

\*Corresponding author: jwjh3516@cju.ac.kr

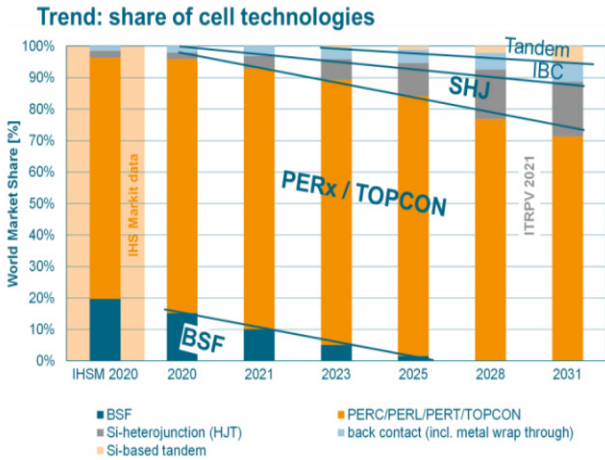


Fig. 1. Global solar cell market trends<sup>2)</sup>

는 태양 빛을 이용하기 때문에 자원이 고갈될 일이 없으며, 인체에 해가 없다는 강점이 있다.

태양전지에 관한 연구는 1906년 처음 시작하여 현재 상용화 단계까지 이르렀고 미래에 화석연료를 대체할 수 있다는 것이 증명되었다<sup>1)</sup>. 하지만 아직까지는 화석 연료를 완전히 대체하기엔 낮은 전환 효율, 값비싼 원재료값 등 문제를 해결하기 위해 많은 연구와 기술 향상이 필요하다.

Fig. 1과 같이 다양한 구조의 태양전지 중 전체 시장의 약 90%를 결정질 실리콘 태양전지(c-Si)가 자리하고 있다<sup>2-3)</sup>. 실리콘 태양전지의 Shockley-Queisser 물리적 해석을 통한 이론 효율은 약 29.5%이다<sup>4)</sup>. 수많은 연구를 통해 실리콘 태양전지는 이론적 한계에 거의 근접하였기 때문에 태양 빛을 더 효율적으로 활용하는 다중 접합 태양전지(탠덤)가 개발되고 있다.

현재 시장에서의 경쟁력을 가지려면 효율 증가, 공정상의 이점 등이 확보 되어야 하는데 이러한 이유로 c-Si를 사용한 탠덤 태양전지가 미래 시장에 도입될 것으로 예측되고 있다<sup>3)</sup>. 품질 및 성능이 검증된 실리콘 태양전지 구조를 가져가면서 상부 태양전지로 밴드갭 조절이 쉽고, 저가의 공정을 사용하는 perovskite를 적용하여 22% 이상의 효율이 구현됨으로써 Si 기반 탠덤 태양전지에 부합한 후보군으로 perovskite가 각광받고 있다<sup>5)</sup>. 본 연구에서는 이슈가 되고 있는 perovskite/SHJ 탠덤 태양전지 중 2-T에 대한 연구 동향을 알아보기로 한다.

## 2. Tandem cell의 구조

탠덤 셀은 빛 흡수 손실을 최소화하기 위해 고안되었으며 서로 다른 밴드갭 에너지를 갖는 2개 이상의 셀을 전기적으로 적층하여 직렬 연결한 구조이다. Fig. 2와 같이 주로 접합부가 결합되는 방식에 따라 4-T와 2-T로 구분되며 4-T의 경우 탠덤 셀을 이루고 있는 2개의 셀이 서로 다른 외부 회로를 통해 전기적으로 연결된다.

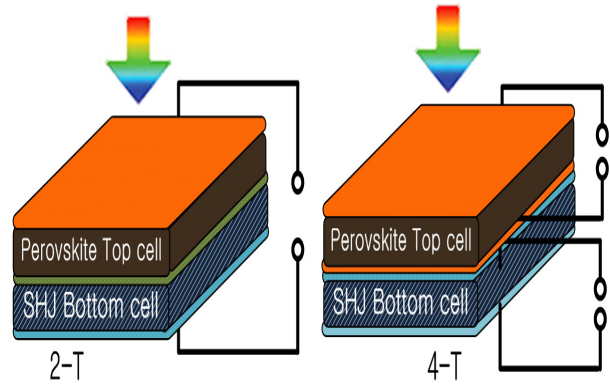


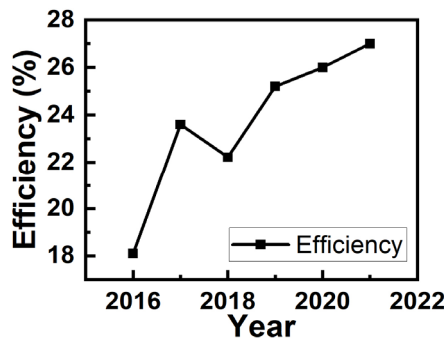
Fig. 2. Types of Tandem Cell Structures

2-T 구조의 탠덤 셀은 같은 기판에 상하부 셀이 순차적으로 제작되며 셀 사이에 증착된 TCO를 통해 직렬 연결된다. 또한 이를 통해 각각의 태양전지에서 생성된 전자와 정공이 나뉘게 된다. 2-T 탠덤 셀의 제작은 서로 다른 외부 회로를 통해 전기적으로 연결되는 4-T 탠덤 셀보다 공정에 제약이 많고 이를 해결하기 위해 상부 셀 공정에 의한 열화가 되지 않는 하부 셀의 각 layer들의 내구성, 상하부 셀의 전류 매칭 등을 생각해야 한다. 하지만 4-T와 비교했을 때 2-T는 사용되는 기판의 수가 적고, 상하부 셀 간의 추가적인 회로 연결이 필요 없어 비용절감이 가능, 추가 기판에 의한 손실되는 빛을 감소시켜 투과율 상승에 따른 높은 변환 효율을 기대할 수 있다.

이렇게 접합된 2개의 태양전지는 서로 다른 밴드갭 에너지를 가지므로 각각 다른 태양 스펙트럼에 반응한다. 일반적으로 탠덤 셀에서 큰 밴드갭 에너지를 갖는 셀이 먼저 빛을 흡수하고, 흡수되지 않은 빛은 투과하여 낮은 밴드갭 에너지를 갖는 하부 셀에서 흡수되며 활용된다. 이러한 원리로 광범위한 태양 빛을 최대한으로 활용하기 위해 고안되었으며, 계산에 의하면 1-sun 조건에서 밴드갭 에너지가 1.9eV인 상부 셀과 1.0eV의 하부 셀을 사용할 경우 최고 42% 효율이 가능하게 된다<sup>6-7)</sup>.

## 3. 2-Terminal tandem cell

Fig. 3은 최근 2-T perovskite/SHJ 탠덤 셀에 대한 효율 그래프이다. S. Albrecht 팀에서는  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 과 같은 유무기 perovskite를 사용해 모놀리식 탠덤 태양전지를 만들었다. 에너지적으로 정렬된 ETL 물질인  $\text{SnO}_2$ 를 저온에서 Atomic Layer Deposition (ALD)을 사용하여 하위 전지의 저온 공정 처리를 위해 구현되었다. 스핀 코팅된 2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl)amino]-9,9'-spirobifluorene (spiro-OMeTAD), 열적으로 증발된  $\text{MoO}_3$  및 스퍼터링으로 증착된 ITO로 구성된 구조는 HTL 역할을 하고 공기/전면 ITO 인터페이스에서 반사를 줄이기 위해 LiF를 증착해 perovskite 흡수 범위 전체에 걸쳐 10% 반사 및 NIR 영역에서 최대 25% 반사 손실을 줄이고 SHJ



**Fig. 3.** Efficiency evolution of 2-T perovskite/SHJ tandem solar cells from late 2016 to 2022

에서  $1.5 \text{ mA/cm}^2$  더 높은 광전류를 만들게해 perovskite 및 Si 서브 셀에 대해 각각  $14.7$  및  $14.0 \text{ mA/cm}^2$ 으로 전류매칭을 하였다. 결론적으로  $1.76\sim 1.78 \text{ V}$  사이의 높은 개방 회로 전압과  $18.1\%$ 의 효율을 만들었다<sup>8)</sup>.

J. Werner 팀에서는 중간 재결합 층으로 유기 탠덤 태양 전지에서 최적의 전기 광학 특성을 가진 IZO를 사용하였다. 두께 최적화를 통해 히스테리시스를 줄이고 또한 SHJ 하부 셀의 손상을 방지하기 위해 저온으로 2단계 증착에 의해 형성된  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite 층을 사용하고 ETL로 PEIE/PCBM 이중층을 사용하는 저온 평면 PSC를 개발했다. 이를 통해 2-methoxyethanol 첨가제가 없는  $44.5 \text{ nm}$ 의 MAI (methylammonium iodide) 흡수층과 비교하여 표면 거칠기가  $R_{\text{rms}} = 9.6 \text{ nm}$ 인 균질하고 편광이 없는 평평한 perovskite 층을 만들어 면적  $0.17 \text{ cm}^2$ 의 2-T 탠덤 태양전지에서  $21.2\%$ 의 효율을 얻었다<sup>9)</sup>.

K.A. Bush 팀에서는 ITO 전극의 후속 스퍼터 증착으로 인한 layer 손상을 방지하고 효율적인 전자 추출을 위한 충분한 버퍼 특성을 갖는 window층으로 저온 ALD 및 pulsed-chemical vapour deposition (CVD)에 의해 증착될 수 있는  $\text{SnO}_2$  및 ZTO 이중층을 소개한다. pulsed-CVD는 당사의 챔퍼언 셀 제조에 사용되었으며, CVD는 ALD에 비해 처리 시간을 단축하고 처리 중 열에 최소화할 수 있는 잠재력이 있기 때문에 주목할만 합니다.

적외선 스펙트럼에 맞춰진 SHJ 위에 우수한 혼합 양이온

PSC에 이 층을 사용하면 히스테리시스가 없고 안정적인 최대 전력으로  $23.6\%$ 의 효율에 도달할 수 있습니다. 또한 성능 손실 시뮬레이션에서는 perovskite의 밴드갭을 넓히고 전면 반사를 줄임으로써 효율성을 더욱 높일 수 있음을 시사하며, 이는 더 높은 전류 밀도와 더 높은 전압을 모두 가능하게 합니다. ALD  $\text{SnO}_2/\text{ZTO}$  이중 레이어가 있는 탠덤은 효율성을  $30\%$  이상 높이는 경로를 통해 산업 표준 작동 수명을 달성하는 유망한 방법을 제시합니다<sup>10)</sup>.

Z. Qiu 팀에서는 다른 밴드갭을 갖는 4개의 혼합 perovskite를 제작, 여기서 밴드갭  $1.69 \text{ eV}$ 를 갖는  $\text{FA}_{0.5}\text{MA}_{0.38}\text{Cs}_{0.12}\text{PbI}_{2.04}\text{Br}_{0.96}$  perovskite가 최고의 성능을 나타냈습니다. Cs는 A site의 일부를 대체하여 PbI 프레임워크와 상호 작용합니다. FA ( $2.2\text{\AA}$ )에 비해 이온 크기( $1.8\text{\AA}$ )가 작기 때문에 Goldschmidt 내성 계수를 잘 조정하여 안정적인 perovskite를 얻을 수 있었습니다. 또한 소량의 Cs는 핵생성 site로 작용하여 perovskite 결정의 더 크고 단일한 수직 성장을 도와 트랩 밀도를 감소시켜 결함이 적어지고 수명이 높아지는 결과로 이어진다. 이러한 결합 형성을 억제할 수 있는 Cs의 존재로 2-T perovskite/SHJ 탠덤의 안정성은 500 시간 안정성 테스트 후에도 원래 효율의  $85\%$  이상 유지되었다. 또한 Spiro-OMeTAD의 단점을 극복하기 위해  $\text{NiO}_x$ 가 HTL로 대체된다면 더 높은 효율에 도달할 수 있을 것이다<sup>11)</sup>.

L. Mazzarella 팀에서는 TCO 및 perovskite 흡수층과 비교하여 Si의 상대적으로 큰 광학 굴절률은 2-T 장치의 내부 접합에서 큰 반사 손실을 가져온다. 손실을 줄이기 위해 Si와 perovskite 사이에 나노 결정질 실리콘 산화물( $\text{nc-SiO}_x\text{:H}$ )의 사용을 제시하였다. 또한 n형 전하 추출층을 통해 빛이 입사할 때 기생 흡수 손실이 적기 때문에 n-i-p 구조를 채용해 전류를  $1.3 \text{ mA/cm}^2$  ( $3.5\%$ ) 증가시켰다. PSC에서는 HTL 물질 poly-TPD에 NPD (N,N'-diphenyl-N,N'-bis(1-naphthyl)-1,1'-biphenyl-4,4"-diamine)를 혼합해 사용하고 ETL은 PCBM 상단에 buffer layer로 BCP를 증착했다. flat한 Si 기판에서 처리된 탠덤 셀의 적외선 반사 손실은  $\text{nc-SiO}_x\text{:H}$ 의 굴절률과 두께, PSC를 최적화하여 전류  $38.7 \text{ mA/cm}^2$ 와  $25.2\%$  효율을 나타냅니다<sup>12)</sup>.

E. Lamanna 팀에서는 ‘기계적 적응’을 통해 SHJ 셀을 보호

**Table 1.** The evolution of 2-T perovskite/SHJ tandem cells

Top cell			Bottom cell	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	FF (%)	Area ( $\text{cm}^2$ )	P.C.E	Year	Ref
ETL	Absorption layer	HTL								
$\text{SnO}_2$	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	Spiro-OMeTAD	SHJ	1.78	14.00	79.5	1	18.1	2016	8
PCBM	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	Spiro-OMeTAD	SHJ	1.69	15.80	79.90	0.17	21.2	2016	9
$\text{SnO}_2$	$\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{Br}_{0.17}\text{I}_{0.83})_3$	$\text{NiO}_x$	SHJ	1.65	18.10	79.00	-	23.6	2017	10
$\text{SnO}_2$	$\text{FA}_{0.5}\text{MA}_{0.38}\text{Cs}_{0.12}\text{PbI}_{2.04}\text{Br}_{0.96}$	Spiro-OMeTAD	SHJ	1.65	16.5	81.1	-	22.22	2018	11
PCBM	$\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{MA}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{BR}_x)_3$	poly-TPD	SHJ	1.79	19.02	74.31	-	25.2	2019	12
$\text{TiO}_2$	CsFAMABrI	PTAA	SHJ	1.80	18.81	75.6	1.20	26.3	2020	13
$\text{SnO}_2/\text{C60}$	CsMAPbBr	PTAA	SHJ	1.82	19.2	74.4	-	26	2020	14
$\text{C}_{60}$ Anchored/a-NbO <sub>x</sub>	$\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.15}\text{FA}_{0.8}\text{Pb}(\text{I}_{0.85}\text{Br}_{0.15})_3$	Spiro-TTB	SHJ	1.8	19.5	75.9	-	27	2021	15

하면서 최적의 밴드갭과 향상된 안정성을 갖는 perovskite인  $\text{Cs}_{0.06}\text{FA}_{0.78}\text{MA}_{0.16}\text{Pb}(\text{Br}_{0.17}\text{I}_{0.83})_3$ 을 사용하고 ETL은 광기전 성능을 향상시키기 위해  $\text{cTiO}_2$  (compact) 및  $\text{mTiO}_2$  (mesoporous)는 각각  $\text{TiO}_2$  전구체 및  $\text{TiO}_2$  나노 입자 용액을 1% 부피의 graphene flakes 분산으로 증착했습니다. graphene flakes를 도핑하게 되면  $V_{oc}$  및 FF가 각각 1.12V, 56%로 증가하는 반면  $J_{sc}$  ( $19.85 \text{ mA/cm}^2$ )의 변화는 없습니다. ‘기계적 적층 방식’은 Si셀의 연마된 전면을 필요로 하지 않고 4-T처럼 독립적으로 제작됩니다. 이 접근 방식은 mesoscopic PSC의 고온( $400^\circ\text{C}$ ) 공정을 견디지 못하는 SHJ 셀에 활용할 수 있는 접근 방식이다. 2-T perovskite/SHJ cell을 조립하기 위해 최적화된 mesoscopic PSC가 Si셀 상단에 약  $1 \text{ kg cm}^{-2}$ 의 압력으로 적층되었습니다. 직렬 저항 및 전자 추출 효율을 향상시킨 고효율 bifacial mesoscopic perovskite를 사용해  $V_{oc}$  1.8V,  $J_{sc}$   $18.81 \text{ mA/cm}^2$ , FF 75.6%, 26.3%의 효율을 보고 했습니다<sup>13)</sup>.

B. Chen 팀에서는 Si 셀의 텍스처링된 표면을 모든 피라미드 구조가  $1 \mu\text{m}$  미만이 되도록 조정된 화학 물질로 완전히 에칭하고  $\text{N}_2$  보조 블레이드 코팅 공정을 사용해 탠덤 장치에서 PSC를 텍스처링된 피라미드 사이의 골에 등각 성장시켜 질감이 있는 Si 표면을 ‘평탄화’한 후, 30 nm 두께의  $\text{C}_{60}$ , 9 nm 두께의  $\text{SnO}_2$  및 60 nm 두께의 ITO 층을 각각 열 증착, ALD, 스퍼터링으로 증착한다. 마지막으로, PSC의 평면에 가까운 표면에서 반사율을 줄이는 질감이 있는 전면 PDMS 레이어로 마감됩니다. 결과로 나온 ‘PDMS/평탄화’ 탠덤은 Si 셀에 대한 값비싼 연마 공정 없이 PSC에 대한 확장 가능한 용액 코팅 방법의 장점과 함께 높은 전류 매칭에 대한 경로를 제공합니다. 이 작업은 Si 내에서 장파장 빛의 경로 길이를 확장하고 반사 손실을  $2.3 \text{ mA/cm}^2$ 로 줄여  $19 \text{ mA/cm}^2$  이상의 일치된  $J_{sc}$  및 26%의 효율을 달성했습니다<sup>14)</sup>.

E. Aydin 팀에서는 ETL로  $\text{C}_{60}$ 을 사용하였다. 하지만  $\text{C}_{60}$ 은 perovskite 용액 처리에 의해 용해되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 대체 ETL을 찾는 과정에서 박막 오산화나이오븀( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )의 낮은 일함수, 넓은 밴드갭, 높은 화학적 및 자외선(UV) 광안정성, 호환성과 같은 유리한 특성을 갖는 물질과 결합하여 다양한 가공기술로 이러한  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  레이어를 n-i-p 구조를 갖는 탠덤에 ETL로 사용하기 위해 RF-스퍼터링 기술을 사용했습니다. 탠덤 셀의 인터페이스에서 감소된 비방사성 재결합 덕분에  $\text{C}_{60}$  고정 a- $\text{NbO}_x$  ETL을 사용하는 PSC 및 perovskite/SHJ 탠덤 모두에 대해 높은 PCE 값을 보여줍니다. 또한 Spiro-OMeTAD의 낮은 정공 이동도, 낮은 전기 전도도 및 불리한 이온화 전위를 해결하기 위해 2,2',7,7'-Tetra(N,N-di-p-tolyl)amino-9,9-spirobifluorene (Spiro-TTB)와  $\text{VO}_x$ 를 더블 레이어로 사용해 보완하였다. 이런 최적화는 n-i-p 구성에서 27% 효율인 2-T perovskite/SHJ 탠덤을 가능하게 했다<sup>15)</sup>.

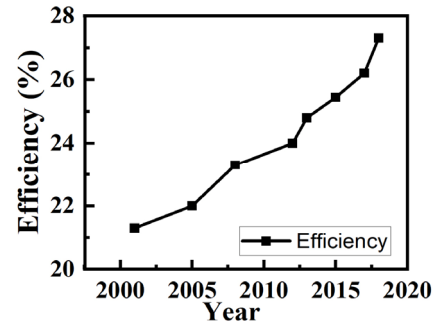


Fig. 4. Efficiency evolution of HIT cells from late 2000 to 2020

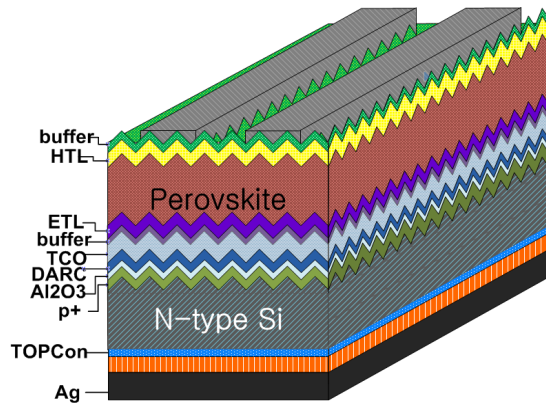
#### 4. Silicon bottom cell

c-Si는 탠덤 셀에 가장 널리 사용되는 Si 이다. 최근에는 이중 접합 태양전지 즉, SHJ이 탠덤의 효율적인 하단 셀로 작용하고 있다. 이중접합은 IR 영역에서 우수한 패시베이션과 낮은 기생 흡수를 제공하여 하단 셀이 스펙트럼 영역의 거의 모든 광자를 가상으로 활용할 수 있게 하고 SHJ은 고품질 표면 패시베이션으로 이어지는 수소 도핑으로 인해 동종 접합 태양 전지에 비해  $V_{oc}$ 가 더 높습니다<sup>16-17)</sup>.

a-Si:H/c-Si 계면에 존재하는 수소는 Si 덩글링(비배위)결합<sup>17)</sup>을 화학적으로 보호하고 결함을 줄입니다. 수소 도핑은 또한 에미터와 Si 웨이퍼 사이의 얇은 buffer층으로 작용하여 고유 박막 이중접합을 유도하며 재결합 손실을 줄입니다<sup>18)</sup>. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)에 의해 증착된 저온 공정( $<200^\circ\text{C}$ )은  $\text{SiH}_4$ /hydrogen 혼합물에 고도로 도핑된 포스핀( $\text{PH}_3$ ) 또는 trimethyl boron를 첨가함으로써 nc-Si:H를 증착합니다<sup>19-21)</sup>. 탠덤으로 사용되는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)와 ITO의 낮은 굴절률로 인한 손실은 nc-SiO<sub>x</sub>:H 층으로 보완할 수 있으며 다른 산소 함량을 갖는 수소화된 단결정 실리콘 이산화물 층은 스펙트럼 선택 중간층으로 사용됩니다<sup>22)</sup>. 도펀트 농도는  $V_{oc}$  및 효율에도 영향을 미칠 수 있으며 도펀트 농도의 증가는 광학 매개변수와 절충해야 하지만 효율성을 향상시킵니다<sup>23)</sup>. 가까운 미래에 perovskite/Si 탠덤에서 하단 SHJ 셀을 Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) 셀로 교체하게 된다면 더 높은 온도의 공정이 가능한 새로운 재료와 제조 단계를 연구하는 좋은 기회를 제공할 수 있다.

#### 5. 결론

perovskite/Si 탠덤 셀은 낮은 비용으로 고효율의 태양전지를 제작할 수 있는 획기적인 기술이다. 하지만 신뢰할 수 있고 효율적인 탠덤을 설계하려면 셀이 서로 적층될 때 개별 layer 성능을 최적화하는 다양한 접근 방식이 필요하다. 기본적으로 높은 효



**Fig. 5.** The schematic 2-T perovskite/TOPCon tandem cell

울의 핵심은 PSC의 밴드갭을 신중하게 선택하는 것이다. 평균적으로 perovskite는 2-T 구성에서 1.65eV에 가까운 밴드갭이 선호된다<sup>24)</sup>. 최근에는 혼합 할로겐화물 perovskite에서 발생하는 분리의 역효과를 방지하기 위해 완전 무기 perovskite로 대체하여 최소화하는 경향이 보인다.

또한 비효율적인 중간층과 상부 셀의 비효율적인 흡수로 인해 발생하는 기생 흡수 손실에 대한 광학 손실을 해결하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. ITO와 같은 재결합 층을 증착할 때 발생하는 하단 layer의 피해를 최소화하기 위해 적절한 증착 기술을 적용하는 것은 매우 중요하다.

ALD 및 증발 기술을 이용해 MoO<sub>x</sub>, Au, Ag와 같은 buffer 층을 사용하면 피해를 최소화할 수 있지만 용액 처리의 효율성을 따라 갈수는 없는 상황이다. 그리고 perovskite의 독성 물질 Pb가 Sn으로 대체된 PSC가 조사되었지만 아직 효율적 측면에서 Pb가 더 우세하다. 따라서 향후에는 Pb를 무독성 2가 양이온으로 대체하여 효율을 더 높여야 하는 문제는 여전히 남아 있다.

Si 셀에서는 낮은 흡수 계수로 인한 빛 흡수가 걸림돌이다. 장치 성능을 향상시키려면 효율적인 조명 관리가 필요하다. 또한 하부 셀로 SHJ가 아닌 연구개발이 진행되고 있는 TOPCon 셀을 도입하는 것도 한 가지 방법이다. 매우 낮은 접합 손상과 더 높은 처리 온도에 대한 내성 등 여러 장점을 갖는 TOPCon 셀이 Fig. 5와 같이 탠덤에 적용된다면 SHJ 보다 더 높은 공정 온도가 필요한 새로운 재료 및 제조 단계를 연구할 수 있는 기회를 제공할 수 있다. 하지만 증착용 도펀트 가스인 BBr<sub>3</sub>에 의한 결정 데미지 등 여러 가지 문제를 해결해야 한다. 이러한 권장 사항을 적용하면 탠덤 셀의 더 높은 효율 개발이 가능해지며 재료 및 장치 확장 모두에 대한 설계 전략에 대한 연구를 더 발전시킬 것이다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(20193020010650,

인쇄 한계 극복을 위한 전극형성/모듈 일체화 기술 개발) 일환으로 수행되었습니다.

이 논문은 2021~2022년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

## References

- [1] Kim, H., Nam, S., Jeong, J., Lee, S., Seo, J., Han, H. and Kim, Y., "Organic Solar Cells Based on Conjugated Polymers : History and Recent Advances," Korean J. Chem. Eng. 31, 1095-1104 (2014).
- [2] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2021 Results, Eight Edition (2021).
- [3] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2016 Results, Eight Edition (2017).
- [4] A. Richter, M. Hermle, S. W. Glunz, "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells," IEEE Journal of Photovoltaics, 3(4), 1184-1191 (2013).
- [5] W. S. Yang, B.-W. Park, E. H. Jung, N. J. Jeon, Y. C. Kim, D. Uk Lee, S. S. Shin, J. Seo, E. K. Kim, J. H. Noh, S. I. Seok, "Iodide management in formamidinium- lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells," Science, 356(6345), 1376-1379 (2017).
- [6] De Vos, A., "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells," J. Phys. D: Appl. Phys, 13(5), 839 (1980).
- [7] Lee, J.-W., Hsieh, Y.-T., Marco, N. D., Bae, S.-H., Han, Q., Yang, Y., "Halide perovskite for tandem solar cells," J.Phys. Chem. Lett., 8(9), 1999-2011 (2017).
- [8] S. Albrecht, M. Saliba, J.P.C. Baena, F. Lang, L. Kegelmann, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlattmann, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Gratzel, B. Rech, "Monolithic perovskite/silicon- heterojunction tandem solar cells processed at low temperature," Energy Environ. Sci., 9, 81-88 (2016).
- [9] J. Werner, C.-H. Weng, A. Walter, L. Fesquet, J.P. Seif, S. De Wolf, B. Niesen, C. Ballif, "Efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with cell area >1 cm<sup>2</sup>," J. Phys. Chem. Lett., 7, 1, 161-166 (2016).
- [10] K.A. Bush, A.F. Palmstrom, Z.J. Yu, M. Boccard, R. Cheacharoen, J.P. Mailoa, D.P. McMeekin, R.L.Z. Hoye, C.D. Bailie, T. Leijtens, I.M. Peters, M.C. Minichetti, N. Rolston, R. Prasanna, S. Sofia, D. Harwood, W. Ma, F. Moghadam, H.J. Snaith, T. Buonassisi, Z.C. Holman, S.F. Bent, M.D. McGehee, "23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability," Nature Energy, 2, 17009 (2017).
- [11] Z. Qiu, Z. Xu, N. Li, N. Zhou, Y. Chen, X. Wan, J. Liu, N. Li, X. Hao, P. Bi, Q. Chen, B. Cao, H. Zhou, "Monolithic perovskite/Si tandem solar cells exceeding 22% efficiency via optimizing top cell absorber," Nano Energy, 53, 798-807 (2018).

- [12] L. Mazzarella, Y.H. Lin, S. Kirner, A.B. Morales-Vilches, L. Korte, S. Albrecht, E. Crossland, B. Stannowski, C. Case, H.J. Snaith, R. Schlatmann, "Infrared light management using a nanocrystalline silicon oxide interlayer in monolithic perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells with efficiency above 25%," *Adv. Energy Mater.*, 9(14), 1803241 (2019).
- [13] E. Lamanna, F. Matteocci, E. Calabrò, L. Serenelli, E. Salza, L. Martini, F. Menchini, M. Izzi, A. Agresti, S. Pescetelli, S. Bellani, A.E.D.R. Castillo, F. Bonaccorso, M. Tucci, A.D. Carlo, "Mechanically Stacked, Two-Terminal Graphene-Based Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with Efficiency over 26%," *Joule*, 4(4), 865-881 (2020).
- [14] B. Chen, J.Y. Zhengshan, S. Manzoor, S. Wang, W. Weigand, Z. Yu, G. Yang, Z. Ni, X. Dai, Z.C. Holman, J. Huang, "Blade-coated perovskites on textured silicon for 26%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells," *Joule*, 4(4), 850-864 (2020).
- [15] E. Aydin, J. Liu, E. Ugur, R. Azmi, G.T. Harrison, Y. Hou, B. Chen, S. Zhumagali, M. De Bastiani, M. Wang, W. Raja, T.G. Allen, A.u. Rehman, A.S. Subbiah, M. Babics, A. Babayigit, F.H. Isikgor, K. Wang, E. Van Kerschaver, L. Tsetseris, E.H. Sargent, F. Laquai, S. De Wolf, "Ligand-bridged charge extraction and enhanced quantum efficiency enable efficient n-i-p perovskite/silicon tandem solar cells," *Energy Environ. Sci.*, 14, 4377-4390 (2021).
- [16] J. Ge, Z.P. Ling, J. Wong, R. Stangl, A.G. Aberle, T. Mueller, "Analysis of intrinsic hydrogenated amorphous silicon passivation layer growth for use in heterojunction silicon wafer solar cells by optical emission spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, 113(23), 234310 (2013).
- [17] B. Macco, J. Melskens, N.J. Podraza, K. Arts, C. Pugh, O. Thomas, W.M.M. Kessels, "Correlating the silicon surface passivation to the nanostructure of low-temperature a-Si: H after rapid thermal annealing," *J. Appl. Phys.* 122(3), 035302 (2017).
- [18] D. Pascual Sánchez, "Crystalline silicon Heterojunction solar cells," in, *Universitat Politècnica de Catalunya* (2015).
- [19] J.J.A.P.L. Meier, R. Fl. fluckiger, H. Keppner, A. Shah, 65, 860 (1994).
- [20] P. Alpuim, V. Chu, J.P. Conde, "Doping of amorphous and microcrystalline silicon films deposited at low substrate temperatures by hot-wire chemical vapor deposition," *J. Vac. Sci. Technol.*, A 19, 2328-2334 (2001).
- [21] H. Keppner, P. Torres, J. Meier, R. Platz, D. Fischer, U. Kroll, S. Dubail, J.A. Anna Selvan, N. Pellaton Vaucher, Y. Ziegler, R. Tschärner, C. Hof, N. Beck, M. Goetz, P. Pernet, M. Goerlitzer, N. Wyrsh, J. Veuille, J. Cuperus, A. Shah, J. Pohl, "The "Micromorph" Cell: a New Way to High-Efficiency-Low-Temperature Crystalline Silicon Thin-Film Cell Manufacturing?," *MRS Proc.*, 452, 865-876 (1996).
- [22] J. Werner, A. Walter, E. Rucavado, S.-J. Moon, D. Sacchetto, M. Rienaecker, R. Peibst, R. Brendel, X. Niquille, S. De Wolf, P. Löper, M. Morales-Masis, S. Nicolay, B. Niesen, C. Ballif, "Zinc tin oxide as high-temperature stable recombination layer for mesoscopic perovskite/silicon monolithic tandem solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, 109, 233902 (2016).
- [23] A.D. Afrasiab, F.E. Khan, A.D. Subhan, S.D. Khan, M.S. Khan, M.S. Ahmad, M. Rehan, M. Noman, "Optimization of efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cell," *Optik. Mat. Sci.*, 164573 (2020).
- [24] A. Ng, Z. Ren, Q. Shen, S.H. Cheung, H.C. Gokkaya, G. Bai, J. Wang, L. Yang, S.K. So, A.B. Djurišić, W.W.-f. Leung, J. Hao, W.K. Chan, C. Surya, "Efficiency enhancement by defect engineering in perovskite photovoltaic cells prepared using evaporated PbI<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I multilayers," *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 9223-9231 (2015).