

# 실리콘 기반 탠덤 태양전지 연구 동향



배수현  
고려대학교  
신소재공학과



이상원  
고려대학교  
신소재공학과



황재근  
고려대학교  
신소재공학과



조경진  
고려대학교  
신소재공학과



이완규  
고려대학교  
신소재공학과



강윤묵\*  
고려대학교  
그린스쿨대학원



이해석\*  
고려대학교  
그린스쿨대학원



김동환\*  
고려대학교  
신소재공학과  
그린스쿨대학원

## 초 록

실리콘 태양전지는 현재 태양광 시장의 90% 이상을 차지하고 있으며 향후에도 기술 개발을 통해 태양광 시장을 주도하는 기술로 예상되고 있다. 실리콘 태양전지의 가격 경쟁력 확보를 위해 새로운 기술이 개발되고 있는 상황에서 효율 한계를 극복하기 위한 탠덤 태양전지 연구가 주목 받고 있다. 실리콘 기반 탠덤 태양전지의 여러 후보 물질 중 페로브스카이트는 공정의 용이성뿐 아니라 물질의 특성이 탠덤 태양전지 소재로서 적합하여 최근 주요하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 페로브스카이트 실리콘 탠덤 태양전지의 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

## 서론

세계적으로 지구 온난화와 기후 변화 문제를 해결하기 위한 친환경적 분야의 연구가 다양하게 진행되고 있다. 인간이 살아감에 있어 반드시 필요한 에너지 문제를 친환경적으로 해결하기 위한 신재생 에너지 기술 또한 주목 받고 있다. 다양한 신재생 에너지 자원 중 태양광은 기존의 화석 연료 및 원자력 에너지의 단점을 보완해 줄 수 있는 에너지원으로 각광받고 있다. 다양한 물질을 기반으로 한 태양전지 중 현재 세계 시장의 90% 이상을 결정질 실리콘 태양전지가 차지하고 있다.<sup>[1]</sup> 또한 다양한 차세대 태양전지 기술이 개발되고 있거나 혹은 이미 개발되었지만 출력 대비 가격 경쟁력 측면에서 유리한 실리콘 태양전지가 향후에도 지속적으로 시장을 선도할 것으로 예측되고 있다.

결정질 실리콘 태양전지는 실리콘의 타입에 따라 p-type 과 n-type 태양전지로 구분된다. 이 중 에미터 도핑, 표면 패시베이션 등의 기술적 제약이 상대적으로 낮은 p-type 태양전지의 경우가 시장을 점유하고 있다. 반면 n-type 태양전지는 제작 공정이 상대적으로 어려운 부분이 있지만 웨이퍼의 전기적 특성이 p-type 보다 우수하여 고효율을 달성할 수 있는 잠재력이 존재하며, 최근 26%를 상회하는 결과가 발표되었다.<sup>[2]</sup>

단일 접합 실리콘 태양전지의 Shockley-Queisser 이론 한계 효율은 약 33%이며,<sup>[3]</sup> Auger recombination, Band gap narrowing, Free carrier absorption 등의 물리적 해석을 고려한 실리콘 태양전지의 이론 효율은 약 29.5%이다.<sup>[4]</sup> 이미 실리콘 태양전지는 이론적 한계에 근접하였기 때문에 태양광 스펙트럼을 효율적으로 활용하는 다중 접합 태양전지, 즉 탠덤 태양전지가 주목 받고 있다.

시장에서의 가격 경쟁력 확보를 위해서는 효율 증가뿐 아니라 공정상의 이점 또한 확보가 되어야 한다. 이와같은 이유로 실리콘 태양전지를 기반으로 한 탠덤 태양전지가 향후 시장에 도입이 될 것으로 예측되고 있다.<sup>[1]</sup> 양산성이 검증된 실리콘 태양전지 구조를 그대로 유지하면서 탠덤 태양전지를 제작하기 위한 여러 기술들이 연구되고 있다.

실리콘 태양전지에 III-V족 태양전지를 접합하여 23.8%의 세계 최고 효율이 보고되기도 하였다.<sup>[5]</sup> 하지만 제품 생산의 관점에서 공정의 용이성 및 공정 단가 저감이 중요하다고 할 수 있다. 최근 상부 태양전지 물질로 밴드갭 조절이 용이하고, 저가 공정이 가능한 페로브스카이트를 적용하여 22% 이상의 효율이 구현됨으로써<sup>[6]</sup> 실리콘 기반 탠덤 태양전지에 적합한 후보군으로 대두되었다. 본 연구에서는 가장 이슈가 되고 있는 페로브스카이트 실리콘 탠덤 태양전지의 연구 동향에 대해 살펴보기로 한다.

## 4-terminal 탠덤 태양전지

앞서 언급한대로 탠덤 태양전지는 태양광 스펙트럼을 효율적으로 활용함으로써 에너지변환 효율을 상승시킬 수 있는 기술로 주목받고 있다. 수광면의 페로브스카이트 태양전지를 통해 단파장대의 빛을 흡수하고, 이 후 하부의 실리콘 태양전지를 통해 장파장대의 빛을 흡수하여 단일 태양전지에 비해 넓은 파장대의 빛을 흡수한다. 그림 1과 같이 실리콘/페로브스카이트 탠덤 태양전지는 이론적으로 40% 이상의 효율을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>[7]</sup>

탠덤 태양전지는 태양전지를 접합하는 방식에 따라 크게 4-terminal 및 2-terminal로 구분된다. 4-terminal 탠덤 태양전지는 두 종류의 태양전지가 서로 전기적으로 분리되어 있으며, 상부의 태양전지가 발전함과 동시에 하부 태양전지의 태양광 스펙트럼 필터로서 작용을 하는 구조

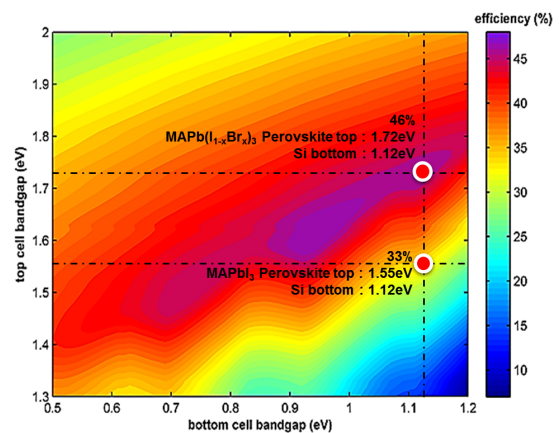


그림 1. 태양전지 물질의 밴드갭에 따른 이론 탠덤 태양전지 효율 계산<sup>[7]</sup>

를 갖는다. 그림 2(a)와 같이 4-terminal 실리콘/페로브스카이트 탠덤 태양전지는 상부셀과 하부셀이 전기적으로 연결되어있지 않고 독립적으로 작동한다. 직렬로 연결이 되지 않은 구조이기 때문에 2-terminal 태양전지에서와 같

이 전류를 매칭할 필요가 없지만 하부 태양전지 효율 증가를 위해 상부 태양전지의 투과도를 향상시키는 연구가 중요하다. 여러 연구기관에서 효율 및 이론 계산 결과에 대한 발표를 진행하였고, 주요한 결과들을 요약하였다(표 1).

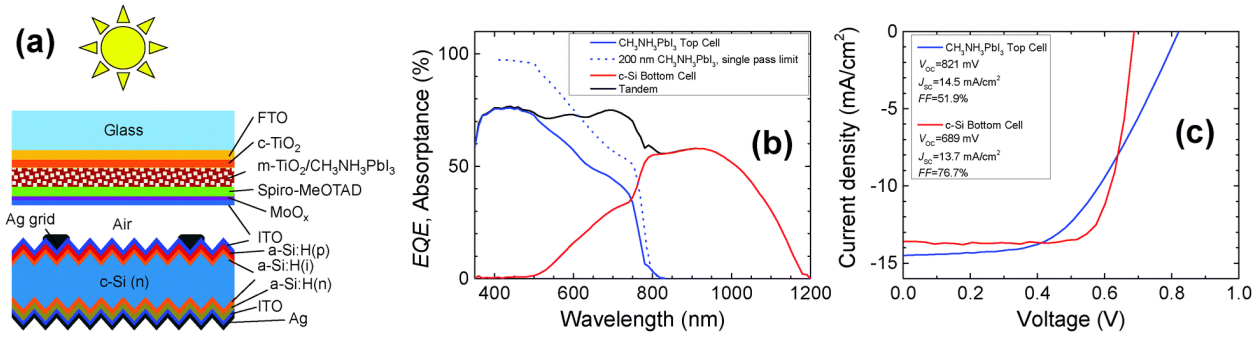


그림 2. 페로브스카이트/실리콘 4 terminal 탠덤 태양전지 개략도 및 특성 분석 결과<sup>[9]</sup>

표 1. 보고된 4-terminal 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 정리

	Cell	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	PCE (%)	Total PCE (%)	Aperture (cm <sup>2</sup> )	Transparen t contact	Ref
1	m-TiO <sub>2</sub> / MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	1,025	17,5	71,0	12,7	17,0	0,12	AgNW	[8]
	Multi-Si	0,547	11,1	70,4	F: 4,3 UnF:11,4				
2	m-TiO <sub>2</sub> / MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	0,821	14,5	51,9	6,2	13,4	0,25	MoO <sub>x</sub> / ITO	[9]
	HIT	0,689	13,7	76,7	7,2				
3	m-TiO <sub>2</sub> / MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	0,87	17,5	68,0	10,36	18,18	0,16	MoO <sub>x</sub> / IZO	[10]
	HIT	0,69	14,6	77,6	F: 7,82 UnF:19,38				
4	m-TiO <sub>2</sub> / MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	1,03	19,0	68,5	13,4	22,8	1,19	MoO <sub>x</sub> / IZO	[11]
	HIT	0,702	17,0	78,6	F: 9,4 UnF: 21,7				
5	PCBM/ FA <sub>0,83</sub> CS <sub>0,17</sub> Pb(I <sub>0,6</sub> Br <sub>0,4</sub> ) <sub>3</sub> / Spiro	1,10	19,9	70,7	15,1	22,4	0,715	ITO(spin)/ ITO(sputter)	[12]
	HIT	0,69	13,9	76,4	F: 7,3 UnF: 19,2				
6	m-TiO <sub>2</sub> / MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	0,95	18,8	69	12,4	20,1	0,25	MoO <sub>x</sub> / ITO	[13]
	PERL	0,64	16,9	73	F: 7,9 UnF: 19,6				
7	PCBM/ MAPbI <sub>3</sub> / PTAA	1,08	20,6	74,1	16,5	23,0	0,07	Cu/Au/BCP	[14]
	HIT	0,679	12,3	77,9	F: 6,5 UnF: 21,2				
8	PCBM/ MAPbI <sub>3</sub> / Spiro	1,069	20,1	76,1	16,4	25,2	0,25	MoO <sub>x</sub> / IO:H/ITO	[15]
	HIT	0,693	15,98	79,5	F: 8,8 UnF: 22,05				
9	m-TiO <sub>2</sub> / Rb <sub>0,05</sub> -FA <sub>0,75</sub> MA <sub>0,15</sub> CS <sub>0,1</sub> PbI <sub>2</sub> Br/ PTAA	1,13	19,4	70,0	15,4	26,4	0,17	MoO <sub>x</sub> / ITO	[16]
	IBC	0,69	18,8	80,0	F: 10,4 UnF: 23,9				

4-terminal 실리콘/페로브스카이트 탠덤 태양전지 연구는 EPFL의 Ballif 교수 팀에서 13.4% 및 18.18%의 효율 ( $0.16\text{cm}^2$ ) 을 보고하였고, 이후 활발한 연구가 진행되었다.<sup>[9,10]</sup> Ballif 교수 팀에서는 하부셀은 HIT 구조의 실리콘 태양전지를 사용하였고 상부셀로는  $\text{MAPbI}_3$ 와  $\text{meso-TiO}_2$  를 사용한 구조의 페로브스카이트 태양전지를 사용하였다. 그림 2(b)에서 페로브스카이트 태양전지(상부셀)는 단파장대의 빛을 주로 흡수하며, 실리콘 태양전지(하부셀)는 장파장대의 빛을 주로 흡수하여 단일 태양전지보다 넓은

파장대에서의 빛을 흡수하여 캐리어를 생성할 수 있고, 페로브스카이트/실리콘 4-terminal 탠덤 태양전지의 가능성을 확인하였다.<sup>[9]</sup> 다음으로 스퍼터 공정 최적화를 통해 IZO 투명 전극을 개발함으로써 상부 투명 페로브스카이트 태양전지의 효율을 10% 이상으로 제작하였고, 그 결과 18% 이상의 탠덤 태양전지 효율을 달성하였다(그림 3).<sup>[10]</sup> 이 논문에서는 상부 페로브스카이트 태양전지에 다공성 구조를 적용하는 경우 하부 태양전지에 광학적 이점을 가져오지 못함을 확인하였으며, 직렬저항과 장파장 투과율

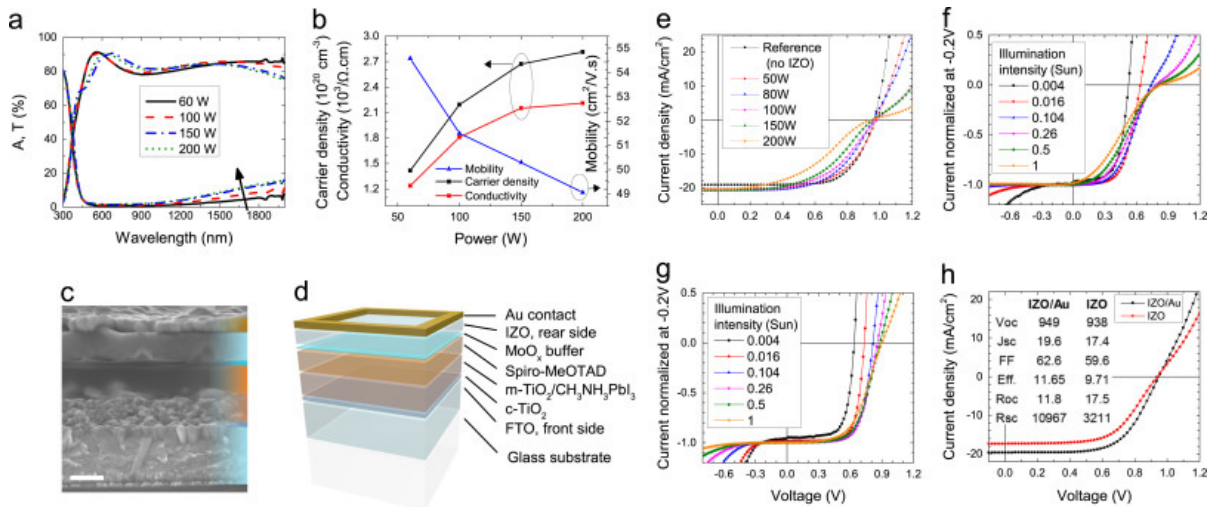


그림 3. 스퍼터 IZO 증착 공정 최적화<sup>[10]</sup>

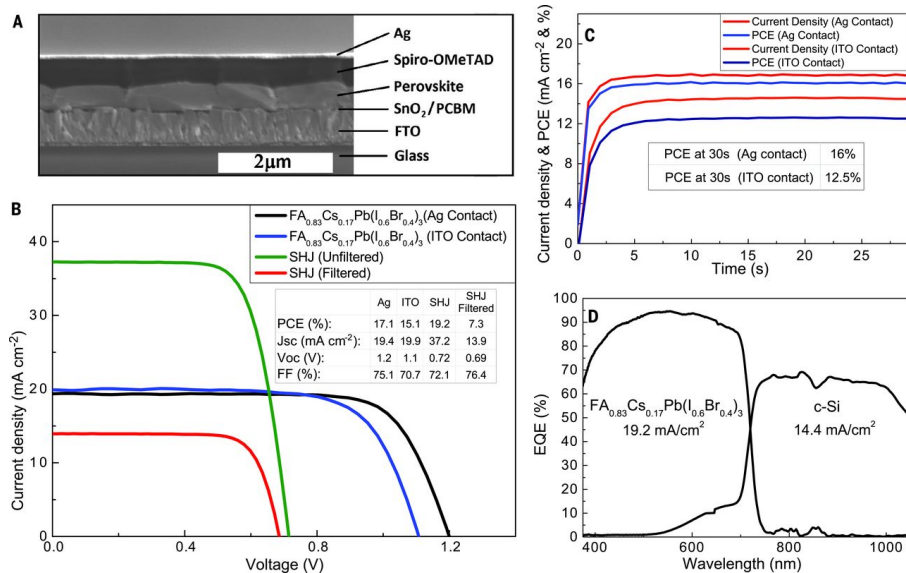


그림 4. Mixed cation 페로브스카이트 태양전지 적용 4-terminal 탠덤 태양전지 특성 및 효율<sup>[12]</sup>

을 개선해야 한다는 결과를 도출하였다.

Oxford 대학의 Snaith 교수 팀은 기존 MAPbI<sub>3</sub> 기반의 상부 페로브스카이트 태양전지의 밴드갭 튜닝(1.74 eV)을 통해 22.4%의 효율을 달성하였다.<sup>[12]</sup> FA, Cs 기반 페로브스카이트 물질을 제작하고 최적화함으로써 밴드갭이 향상되면서도 기존 태양전지와 유사한 결과를 확인하였다. 특히 다공성 구조의 전극을 적용하지 않고 고효율의 투명 박막 태양전지를 제작함으로써 2-terminal 탠덤 태양전지 제작에도 적합한 기술을 개발하였다(그림 4).

다음으로 Nebraska-Lincoln 대학의 Jinsong Huang 교수 팀에서는 투명전극으로 Cu/Au/BCP를 사용함으로써 효율을 23.0%까지 끌어 올렸다.<sup>[14]</sup> 기존의 투명 전극은 대부분 스퍼터 공정을 사용한 TCO(ITO, IZO 등)였지만, 페로브스카이트 박막 손상이 발생하는 문제가 있었다. 본

연구에서는 투명 산화물 전도체 대신 금속 박막을 증착하는 공정을 개발함으로써 전도도와 투과도를 동시에 확보하였다(그림 5).

4-terminal 탠덤 태양전지의 최고 효율은 ANU의 Kylie R. Catchpole 교수팀의 26.4%이다.<sup>[16]</sup> 하부셀로 23.9%의 IBC Cell을 사용하였고 상부셀에 의해 걸러진 파장에 대해서도 10.4%의 높은 효율을 보였다. 상부셀은 FA/MA/Cs/Rb 을 조합하여 밴드갭을 조절하였으며(1.73 eV) PbI<sub>2</sub>가 잔류하지 않는 페로브스카이트 박막을 제작하여 캐리어의 lifetime을 높였다. 또한 하부 태양전지의 광학적 손실 저감을 위하여 전면에 전극이 위치하지 않은 IBC 태양전지를 적용하였다. 4-terminal 탠덤 태양전지는 상부 태양전지의 밴드갭을 변화시키는 연구 및 투과도 증가를 위한 투명 전극 개발에 초점을 맞추고 있다(그림 6).

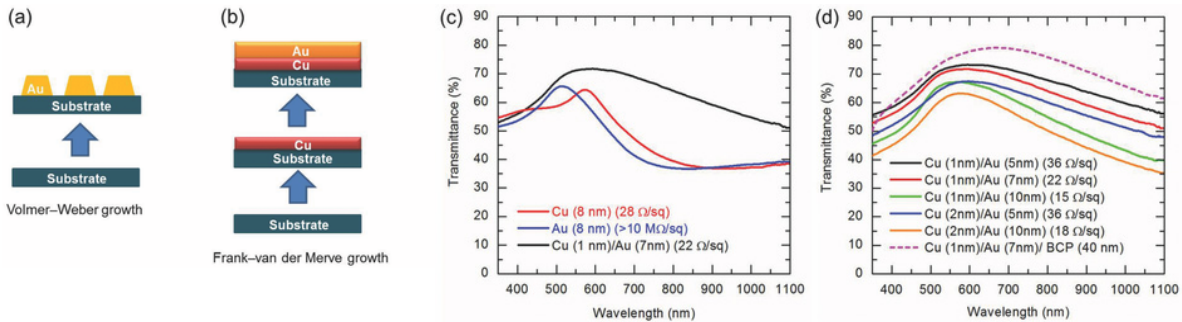


그림 5. 초박형 금속 박막의 공정 모식도 및 투명 전극 적용을 위한 특성 평가<sup>[14]</sup>

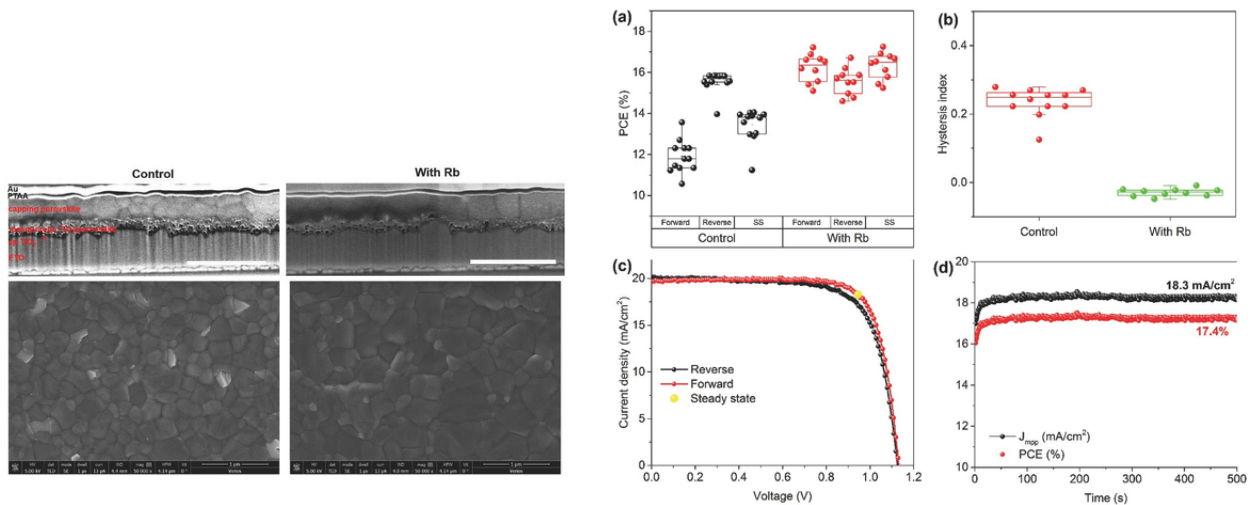


그림 6. Mixed 조성 페로브스카이트 투명 태양전지 개발 및 4-terminal 탠덤 태양전지 적용<sup>[16]</sup>

## 2-terminal 탠덤 태양전지

2-terminal 탠덤 태양전지는, 독립적으로 구동하는 4-terminal 구조와 다른 구동 방식을 가지고 있다. 2-terminal 구조의 경우 상부셀과 하부셀이 전기적으로 직렬로 연결되어 하나의 태양전지로 구동하게 된다. 이와 같은 특성 때문에 2-terminal 태양전지는 monolithic 탠덤 태양전지 라고도 불린다. 2-terminal 태양전지는 하부 셀 위에 상부셀이 직접적으로 제작되기 때문에 소자가 구동할 때 추가적인 전기적 연결 없이 구동이 가능하다. 뿐만 아니라 4-terminal 태양전지에 비해 얇은 투명 전극이 사용되므로 parasitic absorption을 줄일 수 있다. 반면에

독립적으로 제작되어 물리적으로 적층하는 4-terminal 탠덤 태양전지와 달리, 2-terminal 탠덤 태양전지는 상, 하부 셀이 직렬로 연결되기 때문에 recombination layer(혹은 tunnel junction)와 광 전류 매칭이 필요하다.

보편적으로 페로브스카이트/실리콘 2-terminal 탠덤 태양전지는 밴드갭이 작아 (1.12 eV) 장파장대의 빛을 흡수 할 수 있는 실리콘 태양전지가 하부셀로 사용되며 밴드갭이 크고 조절(1.48 eV~2.23 eV)이 가능한 페로브스카이트 태양전지가 상부셀로 사용된다.<sup>[17]</sup> 표 2는 현재까지 보고된 결과들의 요약이다.

MIT의 Buonassisi 연구진과 Stanford의 McGehee 공동연구진은 2015년 13.7%의 효율을 보고하였으며 그림 7

표 2. 보고된 페로브스카이트/실리콘 2-terminal 탠덤 태양전지 요약

	Cell					Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eff. (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	Ref
	Top cell	Bottom cell	ETM	HTM	Intermediate layer						
1	MAPbI <sub>3</sub>	BSF	TiO <sub>2</sub>	Spiro-OMeTAD	n++/p++	1580	11.5	75.0	13.7	1	[18]
2	FA <sub>x</sub> MA <sub>1-x</sub> PbI <sub>3-x</sub> Br <sub>x</sub>	HIT	SnO <sub>2</sub>	Spiro-OMeTAD	ITO	1785	14.0	79.5	18.1	0.16	[19]
3	MAPbI <sub>3</sub>	HIT	PCBM/ PEIE	Spiro-OMeTAD	IZO	1692	15.9	77.6	21.2	0.17	[20]
4	MAPbI <sub>3</sub>	HIT	PCBM/ PEIE	Spiro-OMeTAD	IZO	1720	16.4	73.1	20.5	1.43	[20]
5	Cs <sub>0.17</sub> FA <sub>0.83</sub> Pb(Br <sub>0.17</sub> I <sub>0.83</sub> ) <sub>3</sub>	HIT	SnO <sub>2</sub> / PCBM	NiO	ITO	1650	18.1	79.0	23.6	1	[21]

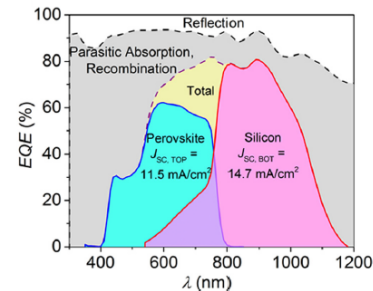
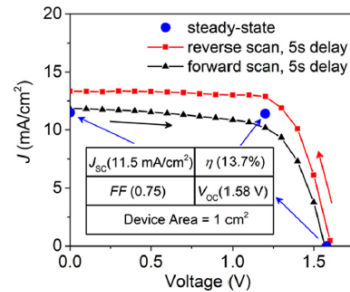
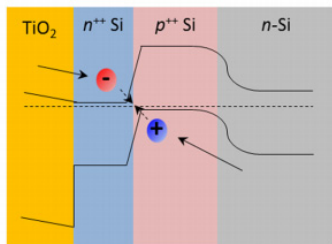
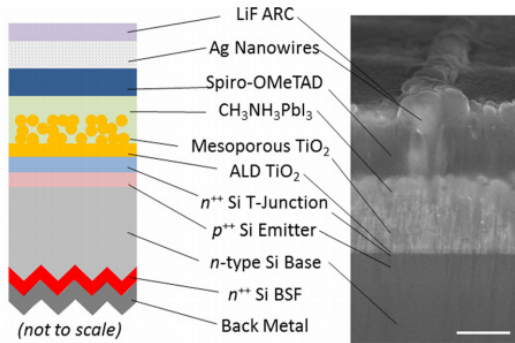


그림 7. MIT, Stanford 공동연구진이 최초로 보고한 페로브스카이트/실리콘 2-terminal 탠덤 태양전지 개략도 및 소자성능<sup>[18]</sup>

은 연구진이 보고한 소자의 모습과 성능을 나타낸다.<sup>[18]</sup> 공동연구팀은 n-type 실리콘 웨이퍼에 과 도핑 된 p-type 에미터와 과 도핑 된 n-type back surface field(BSF)를 사용하여 하부 실리콘 태양전지를 제작하였다. 상부 페로브스카이트 태양전지는 광 흡수층으로 MAPbI<sub>3</sub>, 전자전달층과 정공전달층으로 각각 다공성 TiO<sub>2</sub> 와 Spiro-OMeTAD를 사용하였다. 상부 투명전극으로는 Ag 나노와이어를 전사하여 제작하였으며 LiF 반사방지막을 증착하여 광흡수를 증가시켰다. 상부셀과 하부셀의 연결 부위로 사용되는 tunnel junction의 경우 PECVD 장비를 사용하여 a-Si:H 층을 증착하고 열처리하여 제작하였다. 2015년 10월 스위스 EPFL의 Gratzel 외 연구진은 하부셀을 개방전압이 높은 HIT로 대체하고, 상부셀 제작 시 발생하는 공정상의 제한을 극복하기 위한 저온 공정 도입, Mixed 페로브스카이트를 사용하여 상,하부셀의 전류를 매칭하였다.(그림 8).<sup>[19]</sup> 또한 스퍼터 공정을 적용하여 상부셀 투명 전극을 제작 시 발생할 수 있는 스퍼터 데미지를 방지하기 위한 희생 층을 도입하였다. 그림 8은 EPFL에서 보고한 소자의 개략도 이다. 결과적으로 MIT와 Stanford의 공동 연구에 비해 전압과 전류 모두 큰 폭으로 상승하여 18.1%의 효율이 보고되었다.

다음으로 EPFL의 Ballif 연구진은, 시뮬레이션을 통하여 광학적으로 최적화된 박막을 적용하여 21.2% 효율의 탠덤 태양전지를 보고 하였다(그림 9).<sup>[20]</sup> 또한 동일한 구

조를 사용하여 현재까지 문헌상으로 보고된 2-terminal 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지 중 가장 넓은 면적에서(1.43 cm<sup>2</sup>) 20.5%를 발표하였다.<sup>[20]</sup>

최근 2017년 Stanford의 McGehee 연구진, Oxford의 Snaith 연구진, MIT의 Bounassisi 연구진은 1 cm<sup>2</sup>에서 23.6% 효율을 갖는 탠덤 태양전지를 보고하였다(그림 10).<sup>[21]</sup> 공동 연구진은 상부셀과 하부셀의 전류 매칭을 최적화 하고 안정성을 확보하기 위하여 Cs과 FA를 양이온으로, Br과 I를 halide로 사용한 페로브스카이트를 상부셀로 사용하였다. 전자 전달층과 정공전달층 역시 안정한 소재로 알려진 SnO<sub>2</sub>과 NiO를 사용하였으며, 결과적으로 봉지재를 적용한 상태에서 온도 85°C, 상대습도 85%, 1,000 시간 안정성 시험을 통과하였다. 또한 하부셀의 후면부에 실리콘 나노 파티클을 형성하여 장파장 빛의 흡수를 향상시켰으며, 고온 공정이 필요한 용액 기반의 NiO 박막을 저온·장시간 열처리 공정으로 대체하였다. 표면이 거친 Mixed 페로브스카이트로 인한 shunt 및 short 방지를 위하여 LiF 층을 추가로 사용하였으며 전자 전달층의 conformal 코팅을 위하여 Chemical Vapor Deposition(CVD)공정과 Atomic Layer Deposition(ALD)공정을 도입하였다.

현재까지 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지는 Mixed 페로브스카이트 사용, 반사방지막 도입, 하부셀 후면 구조 개선, 구성 층들의 두께 조절 등을 통한 전류 매칭과, 저온 공정 개발, 스퍼터 데미지 방지를 위한 희생 층 도입을 중

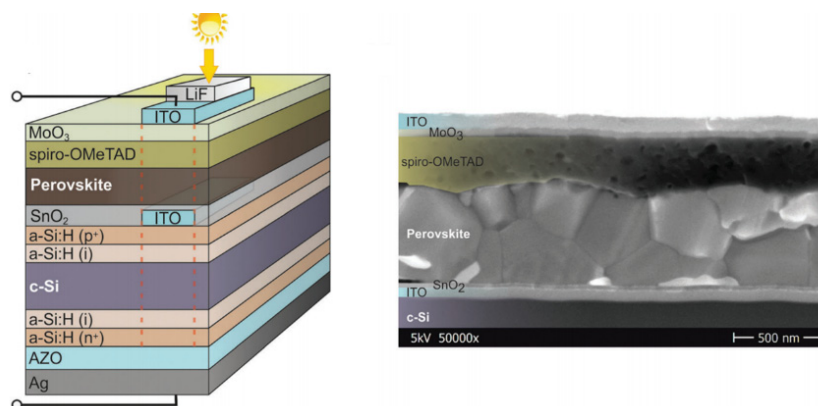


그림 8. EPFL Gratzel 외 연구진이 보고한 HIT, 저온 공정, Mixed 페로브스카이트, 희생층을 적용한 2-terminal 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양 전지 개략도<sup>[19]</sup>

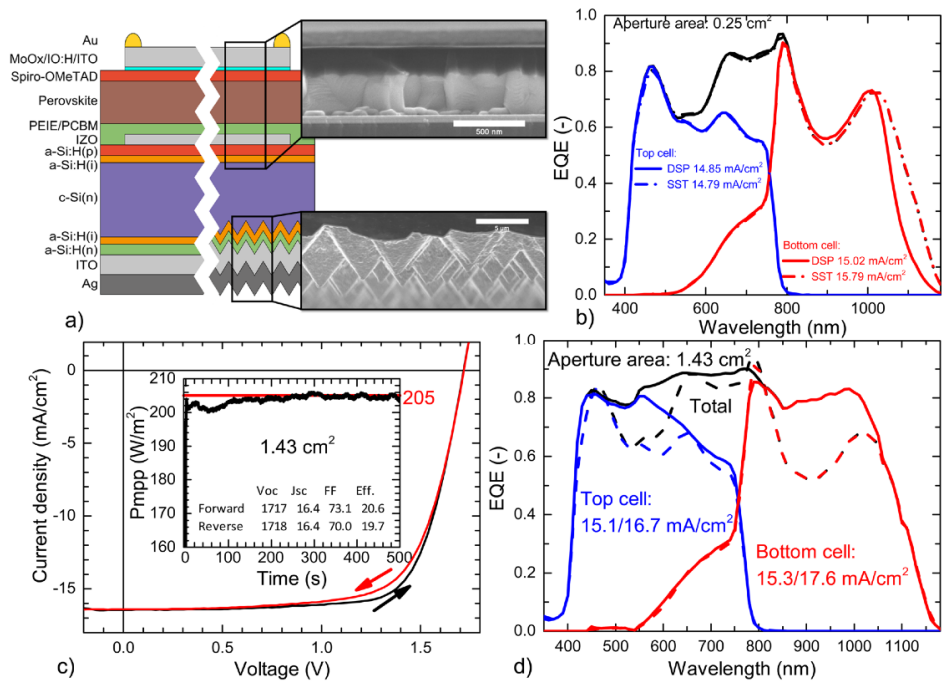


그림 9. EPFL Ballif 외 연구진이 보고한 1.43 cm<sup>2</sup> 페로브스카이트/실리콘 2-terminal 탠덤 태양전지 개략도 및 소자 성능<sup>[20]</sup>

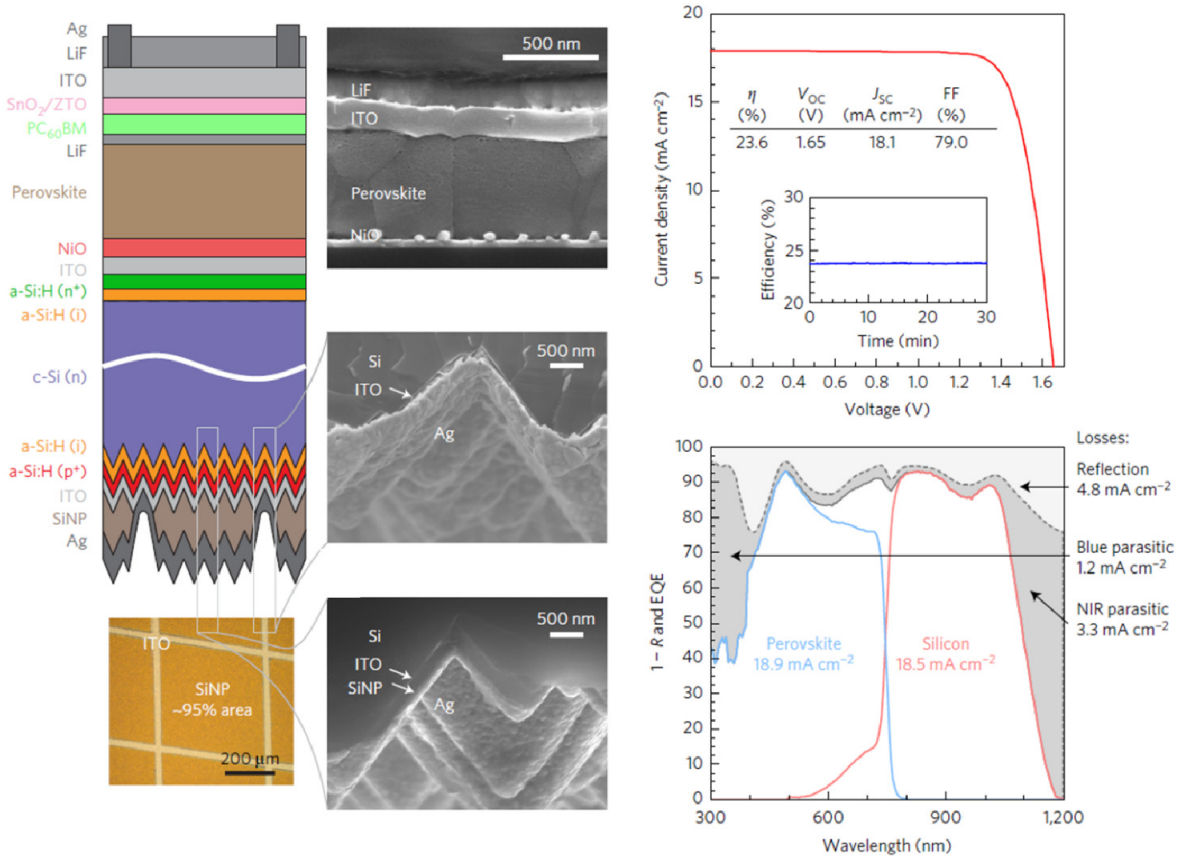


그림 10. McGehee, Snaith, Bounassisi 외 연구진이 보고한 23.6% 탠덤 태양전지 개략도 및 소자 성능<sup>[21]</sup>



심으로 기술 개발이 이루어졌다. 그 결과로 2015년 3월 13.7% 최초 보고에서부터 현재 23.6%까지 효율 상승이 이루어졌다. 한 가지 주목할 만한 점은 현재까지 제작된 페로브스카이트/실리콘 2-terminal 탠덤 태양전지의 경우 하부셀 전면의 텍스처링이 모두 제거되어 평평한 구조라는 점이다. 이는 기존의 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술개발이 대부분 용액법 기반으로 이루어졌기 때문이다. 현재 실리콘 태양전지의 경우 마이크로 사이즈를 갖는 텍스처 구조가 대부분인데, 수백 나노미터의 두께를 갖는 페로브스카이트를 이러한 구조 위에 용액법을 기반으로 제작하기에는 기술적인 한계가 따른다. 하부셀 전면의 텍스처링이 제거될 경우, 하부셀이 흡수 할 수 있는 광량이 감소하게 되어 전체 소자의 전류가 약  $2 \text{ mA/cm}^2$  감소하게 된다.<sup>[20]</sup> 따라서 향후 실리콘 텍스처 구조 위에 페로브스카이트를 제작한다면 탠덤 태양전지 효율이 증가할 것이며, 30% 이상도 가능할 것으로 보고되고 있다. 또한 Intrinsic 손실만 가정하면 상부셀 1.9 eV, 하부셀 1.0 eV 의 밴드갭 에너지를 갖는 물질을 사용하는 경우 약 42%까지 효율 달성 가능성이 가능할 것으로 보고된 바 있다.<sup>[22]</sup>

## 결론

시장의 90% 이상을 차지하는 실리콘 태양전지는 효율 향상을 위한 끊임없는 연구로 단일접합 구조의 한계 효율에 다가가고 있다. 더욱이 지속적으로 시장 경쟁력을 유지하기 위해 한계 효율을 극복할 수 있는 연구가 필요한 상황이며, 탠덤 태양전지가 유력한 방안이 될 수 있다. 특히 실리콘 태양전지를 기반으로한 탠덤 태양전지는 수십년간 쌓아 온 기술력과 시장의 신뢰도까지 활용할 수 있는 장점도 크다고 할 수 있다. 페로브스카이트 태양전지는 고효율이 보고되었을 뿐 아니라 제작의 용이성, 저가화, 밴드갭 조절 등의 특징 또한 가지고 있어 탠덤 태양전지의 유망한 물질이라고 할 수 있다. 지속적 연구 개발을 통해 단일접합 효율 한계를 극복하고 동시에 안정적으로 산업

에 적용됨으로써 태양광 산업의 경쟁력을 확보할 수 있는 기술이 되기를 기대한다.

## 참고문헌

- [1] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2016 Results, Eight Edition, 2017
- [2] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%," *Nature Energy*, 2017, 2, 17032.
- [3] W. Shockley, H. J. Queisser, "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells," *J. Appl. Phys.*, 1961, 32, 510.
- [4] A. Richter, M. Hermle, S. W. Glunz, "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3(4), 1184.
- [5] S. Essig, C. Alleb, T. Remo, J. F. Geisz, M. A. Steiner, K. Horowitz, L. Barraud, J. S. Ward, M. Schnabel, A. Descoedres, D. L. Young, M. Woodhouse, M. Despeisse, C. Ballif, A. Tamboli, "Raising the one-sun conversion efficiency of III-V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions," *Nature Energy*, 2017 6, 17144.
- [6] 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*, 2017, 356(6345), 1376.
- [7] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/tandem-cells>.
- [8] C. D. Bailie, M. G. Christoforo, J. P. Mailoa, A. R. Bowring, E. L. Unger, W. H. Nguyen, J. Burschka, N. Pellet, J. Z. Lee, M. Grätzel, R. Noufi, T. Buonassisi, A. Salleo, M. D. McGehee, "Semi-transparent perovskite solar cells for tandems with silicon and CIGS," *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8, 956.
- [9] P. L. Per, S.-J. Moon, S. M. de Nicolas, B. Niesen, M. Ledinsky, S. Nicolay, J. Bailat, J.-H. Yum, S. D.

- Wolf, C. Ballif, "Organic-inorganic halide perovskite/crystalline silicon four-terminal tandem solar cells†," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, 17, 1619.
- [10] J. Werner, G. Dubuis, A. Walter, P. L. Per, S.-J. Moon, S. Nicolay, M. M.-Masis, S. D. Wolf, B. Niesen, C. Ballif, "Sputtered rear electrode with broadband transparency for perovskite solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 141, 407.
- [11] J. Werner, S.-J. Moon, P. L. Per, A. Walter, M. Filipič, C.-H. Weng, L. L. Fgren, J. Bailat, M. Topič, M. M.-Masis, R. Peibst, R. Brendel, S. Nicolay, S. D. Wolf, B. Niesen, C. Ballif, *Towards ultra-high efficient photovoltaics with perovskite/crystalline silicon tandem devices, 31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, 2015, Hamburg, Germany.
- [12] D. P. McMeekin, G. Sadoughi, W. Rehman, G. E. Eperon, M. Saliba, M. T. H rantner, A. Haghighirad, N. Sakai, L. Korte, B. Rech, M. B. Johnston, L. M. Herz, H. J. Snaith, "A mixed-cation lead mixed-halide perovskite absorber for tandem solar cells," *Science*, 2016, 351(6269), 151.
- [13] T. Duong, N. Lal, D. Grant, D. Jacobs, P. Zheng, S. Rahman, H. Shen, M. Stocks, A. Blakers, K. Weber, T. P. White, K. R. Catchpole, "Semitransparent perovskite solar cell with sputtered front and rear electrodes for a four-terminal tandem," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, 6(3), 679.
- [14] B. Chen, Y. Bai, Z. Yu, T. Li, X. Zheng, Q. Dong, L. Shen, M. Boccard, A. Gruverman, Z. Holman, J. Huang, "Efficient semitransparent perovskite solar cells for 23.0%-efficiency perovskite/silicon four-terminal tandem cells," *Adv. Energy Mater.* 2016, 6, 1601128.
- [15] J. Werner, L. Barraud, A. Walter, M. Br uninger, F. Sahli, D. Sacchetto, N. T reault, B. P. -Salomon, S.-J. Moon, C. Alleb, M. Despeisse, S. Nicolay, S. D. Wolf, B. Niesen, C. Ballif, "Efficient near-infrared-transparent perovskite solar cells enabling direct comparison of 4-terminal and monolithic perovskite/silicon tandem cells," *ACS Energy Lett.*, 2016, 1(2), 474.
- [16] T. Duong, Y. L. Wu, H. Shen, J. Peng, X. Fu, D. Jacobs, E.-C. Wang, T. C. Kho, K. C. Fong, M. Stocks, E. Franklin, A. Blakers, N. Zin, K. McIntosh, W. Li, Y.-B. Cheng, T. P. White, K. Weber, K. Catchpole, "Rubidium multication perovskite with optimized bandgap for perovskite-silicon tandem with over 26% efficiency," *Adv. Energy Mater.* 2017, 7, 170022.
- [17] G. E. Eperon, S. D. Stranks, C. Menelaou, M. B. Johnston, L. M. Herz, H. J. Snaith, "Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells," *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 982.
- [18] J. P. Mailoa, C. D. Bailie, E. C. Johlin, E. T. Hoke, A. J. Akey, W. H. Nguyen, M. D. McGehee, T. Buonassisi, "A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction," *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106, 121105.
- [19] S. Albrecht, M. Saliba, J. P. C. Baena, F. Lang, L. Kegelmann, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlatmann, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Gr tzel, B. Rech, "Monolithic perovskite/silicon-heterojunction tandem solar cells processed at low temperature†," *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 81.
- [20] J. Werner, C.-H. Weng, A. Walter, L. Fesquet, J. P. Seif, S. D. Wolf, B. Niesen, C. Ballif, "Efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with cell area >1 cm<sup>2</sup>," *J. Phys. Chem. Lett.*, 2016, 7(1), 161.
- [21] 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*, 2017, 2, 17009.
- [22] M. Filipič, P. L. Per, B. Niesen, S. D. Wolf, J. Krč, C. Ballif, M. Topič, "CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite/silicon tandem solar cells: characterization based optical simulations," *Optics Express*, 2015, 23(7), A263.