

# 차세대 전하선택형 실리콘 태양전지 연구동향



박철민  
성균관대학교  
에너지과학과



안시현  
성균관대학교  
정보통신대학



이준산\*  
성균관대학교  
정보통신대학

## 서론

실리콘 기판을 이용한 태양전지의 세계 최고 변환 효율은 1999년에 UNSW에서 발표된 PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused)구조의 24.7%를<sup>[1]</sup> 거쳐 올해 Kaneka에 의해 발표된 HJ-IBC (Heterojunction-Interdigitated Back Contact)구조의 26.3%에<sup>[2]</sup> 이르렀으나, 최고 효율을 달성했던 대부분의 태양전지는 복잡한 구조와 제작 공정을 바탕으로 효율을 상승 시켜왔다. 이러한 복잡한 구조를 이용하지 않고도 초고효율이 달성 가능한 태양전지 구조개발은 태양전지의 제조시간 및 비용의 감소를 위해 최근에 중요한 연구 분야로 주목받고 있다.

그 중에서도 전하선택접합형(Carrier Selective Contact, CSC) 실리콘 태양전지는 구조가 간단하여 기존 양산 공정과 쉽게 연계가 가능하고, 고온의 확산공정을 배제할 수 있으며, 전하의 선택적인 수집을 바탕으로 고효율 달성이 가능하여 현재 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야이다.

전하선택접합 태양전지는 전자(electron) 및 정공(hole) 한쪽에 대해 barrier height에 의해 움직임을 제어하거나 blocking/ tunneling을 통해 선택적으로 전하를 수집할 수 있는 구조를 통칭하며, 전자에 대한 선택형 접촉을 ESC(electron selective contact), 정공에 대한 선택형 접촉을 HSC(hole selective contact)이라고 분류할 수 있다. 전하선택접합형 태양전지 구조에서 전하들의 원활한 이동을 위한 표면 처리(surface passivation) 기술과 전하선택형 접촉층의 형성 기술이 중요하다.

본 글에서는 차세대 전하선택형 실리콘 태양전지의 구현에 있어서 필수 요소인 전하선택형 접촉층 및 표면처리 기술의 이해와 이를 기반 한 고효율 태양전지 개발 현황을 소개하고자 한다.

# 본 론

## 전하선택형 태양전지 구조, 소재와 작동 원리

일반적인(Conventional, PERC, 이종접합) 및 전하선택 접합형 태양전지의 구조를 그림 1에 나타내었다. 기존의 일반적인 태양전지와는 다르게 전하선택접합 태양전지의 경우 상대적으로 간단한 구조를 띄며, 제작공정 역시 기판의 표면 조직화(Texture)이후 표면 보호 및 전하의 배리어로 작용하는 실리콘 산화막의 형성 이후 ESC와 HSC를 위한 박막의 형성으로 제작 공정이 마무리 되는 것을 확인할 수 있다.

전하선택형 태양전지는 고온 확산법 또는 이온 주입 공정을 이용한 확산층의 형성과 선택적 에미터 및 BSF(back surface field)의 국부적 형성을 위한 복잡한 패터닝 공정을 제거함으로써 태양전지의 제작공정을 단순화 할 수 있으며, 접합부분에서의 재결합을 낮춤으로써 높은 효율을 달성할 수 있다.

전하선택형 실리콘 태양전지의 제작을 위해 사용할 수 있는 물질의 목록과 그 물질 그룹에 대한 band edge의 위치를 그림 2에서 확인할 수 있다. 현재 버퍼층(tunneling layer)으로 일반적으로 사용되는 SiO<sub>2</sub>는 실리콘 표면을 우수한 특성으로 패시베이션 할 수 있으면서, 매우 넓은 에너지

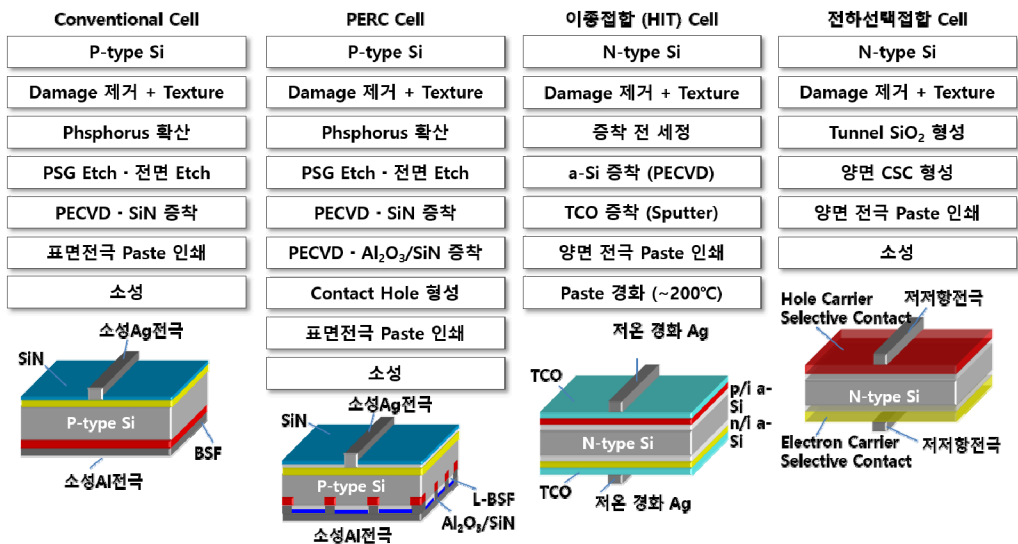


그림 1. 기존 태양전지(Conventional, PERC, 이종접합) 및 전하선택접합 태양전지의 구조 및 제작 순서

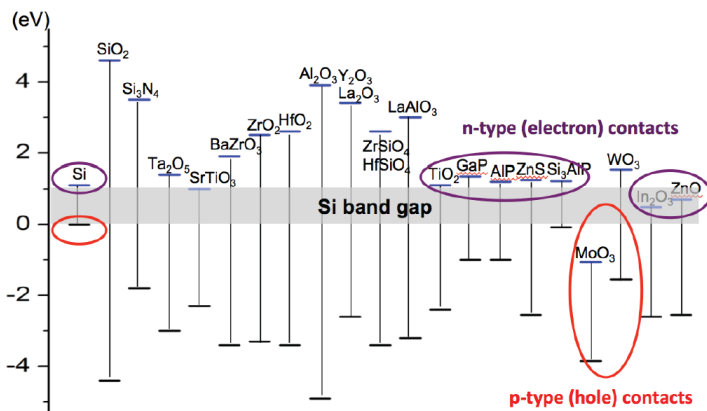


그림 2. 실리콘의 밴드갭에 기반한 전하 및 정공의 선택접합층에 사용 가능한 물질<sup>[3]</sup>

지 간격을 가지기 때문에 전하의 blocking과 tunneling 역할을 동시에 수행하기에 적합하므로 가장 널리 쓰이고 있다.

그림에서 보여지는 보라색 원 안의 물질(Si, TiO<sub>2</sub>, GaP, AlP, ZnS, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO)은 실리콘과 유도 밴드 최소값(conduction band minimum, CBM)에 가깝거나 넓은 에너지 간격을 가지고 실리콘의 CBM 근처에서 일함수를 갖기 때문에 전자의 선택적인 접합에 적합하다. 또한, 정공의 선택적 접합에 적합한 물질은 빨간색 원 안에 표시되어 있고, 전자의 선택적 접합에 비해 물질의 수가 많지 않음을 확인할 수 있는데 대부분 금속 산화물은 에너지적으로 매우 큰 가전자대 최대값(valence band maximum, VBM)을 가지며 p-type이 될 수 없기 때문에 정공의 선택적 접합층의 형성에 있어 문제가 되기 때문이다. 그림에서와 같이 높은 일함수를 갖는 n-type의 MoO<sub>3</sub>와 p-type의 실리콘과 가까운 에너지 간격을 갖는 WO<sub>3</sub>가 정공의 선택적 접합층으로 사용될 수 있는데, 두 가지 물질 모두 투명전도막(Transparent conductive oxide)이므로 전면의 접합층 형성에 있어서 이점이 있으며, MOx/a-Si:H를 이용한 구조로 높은 개방전압이 보고되고 있다.<sup>[4]</sup>

하지만 현재까지 가장 좋은 특성을 보이고 있는 전하선

택접합층은 다결정 실리콘(Poly-Si)을 이용한 경우인데, 다결정 실리콘을 이용했을 경우에 전하의 선택성(carrier selectivity)이 다결정 실리콘의 도핑에 의한 전계효과에 기반하여 좋은 특성을 보이기 때문이다.

전하선택형 실리콘 태양전지의 에너지 밴드 다이어그램 및 동작원리를 그림 3에서 확인할 수 있으며, 일반적인 태양전지의 동작원리와는 다르게 전하의 수집과 분리에 있어서 tunneling과 reflection에 기반한 메커니즘을 바탕으로 전자와 정공이 tunneling passivation layer를 지나서 에미터와 BSF로 표시된 HSC, ESC층으로 수집되어 전하 선택형 태양전지는 동작된다. 실리콘 산화막을 이용하여 실리콘 표면에서의 전하 재결합에 의한 손실을 최소화 하고, HSC / ESC층의 전기적·광학적 특성 최적화를 통해 캐리어의 선택성을 증가시키는 것이 차세대 전하선택형 실리콘 태양전지의 고효율화에 핵심기술이라고 할 수 있다.

### 전하선택형 태양전지의 연구 현황

앞서 언급한바와 같이, 전하선택형 태양전지 구조에서 고효율화에 필요한 두 가지 기술은 전하들의 원활한 이동

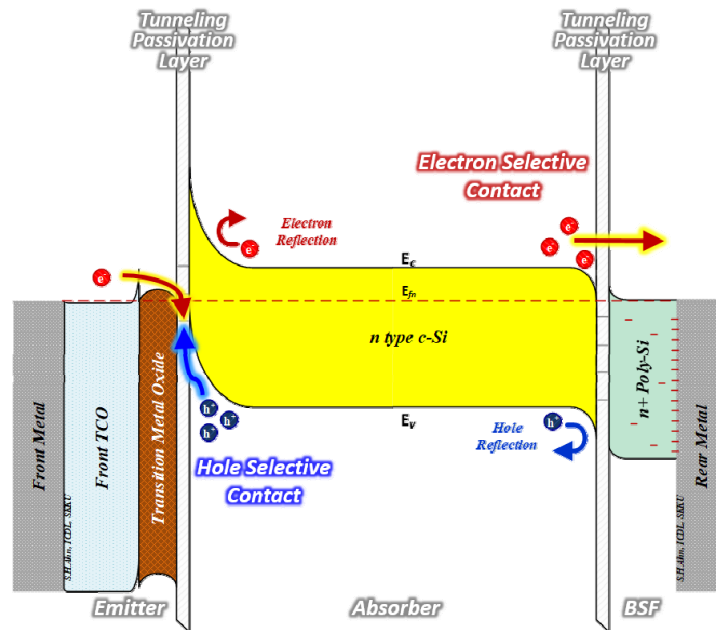


그림 3. 전하선택형 실리콘 태양전지의 에너지 밴드 다이어그램 및 동작원리

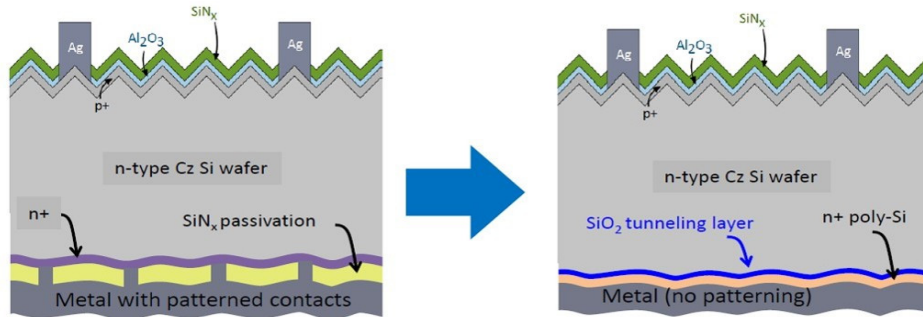


그림 4. 고효율 PERC 태양전지 구조와 전자선택형접촉 구조인 Tunnel oxide passivated contact(TOPCon) 태양전지 구조

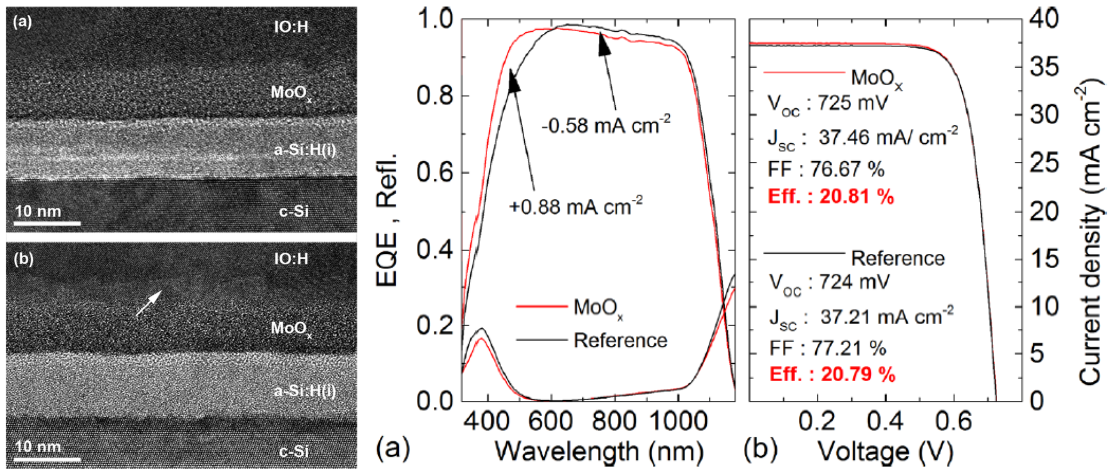


그림 5. MoOx를 이용한 전하선택형 실리콘 태양전지의 구조 및 출력특성<sup>[4]</sup>

을 위한 표면처리(surface passivation) 기술과 전자선택형 접촉층 형성 기술이다. 이 두 가지 기술을 비교적 쉽게 해결하면서도 고효율을 달성한 대표적인 구조는 그림 3에 나타난 독일 Fraunhofer 연구소에서 tunnel-oxide(T<sub>ox</sub>)와 phosphorus-doped(n+) poly-Si를 이용하여 효율 25% 이상을 달성한 태양전지가 있다. Tunnel-oxide(T<sub>ox</sub>)와 poly-Si를 증착 후 annealing을 통해 표면 패시베이션과 전자선택형접촉을 동시에 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다.

정공 선택형 태양전지는 아직까지 전자 선택형 보다는 효율이 조금 더 낮은 22% 정도가 최고 기록으로 보고되고 있다.<sup>[4]</sup> 이것은 tunnel-oxide가 electron과 hole에 대한 energy barrier height 차이, boron doped layer의 defect density, boron의 diffusion 등의 이유에 의한 것

으로 보여지고 있으며, 사용된 물질로는 유럽의 EPFL에서 p-Si를 이용하였고,<sup>[5]</sup> ISFH는 Boron을 도핑 한 poly-Si를 이용한 구조를 제시하였다.<sup>[6]</sup>

이밖에 다양한 금속 산화물을 이용한 연구는 ANU에서 MoO<sub>x</sub>, WO<sub>x</sub> 등의 전이형 금속 산화물 TMO(Transition Metal Oxide) 물질들이 연구되고 있다. 현재까지 효율 달성에서는 MoO<sub>x</sub>를 이용하여 Christophe Ballif 교수팀이 22.5% hole selective 구조로 최상위급 특성을 달성하였다.<sup>[4]</sup>

표 1에서는 전하선택형 실리콘 태양전지를 연구하는 팀들의 연구 결과를 정리 해 두었다. 전자 선택형에 비하여 정공 선택형 태양전지에서 고효율 달성을 위해 보다 개선된 연구가 필요한 상황이다.

표 1. 전자선택형 실리콘 태양전지 주요 연구기관의 구조 및 효율

	Research Institute	Structure	Passivated & Transfer layer	Electrode	Carrier Contact Type	Eff (%)	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
Electron Selective Contact(ESC) Solar Cell	Panasonic	HIT(Double side junction) <sup>[7]</sup> (IBC-HIT) <sup>[2]</sup>	i-a-Si/ doped a-Si	TCO & Metal	Electro/ Hole	24.7 25.6	750 740	39.5 41.8	83.2 82.7
	Sunpower	IBC(Passivated contact) <sup>[8]</sup>	SiOx/ doped poly-Si	Metal	Electro/ Hole	24.1	734	40.4	81.5
	SKKU	HIT(Double side junction)	i-a-Si/ doped a-Si	TCO & Metal	Electron	23.5	737	41	79.6
	Silevo <sup>[9]</sup>	Tunnel oxide	SiOx/ doped a-Si	TCO & Metal	Electro/ Hole	23.1	739	38.9	80.5
	Fraunhofer	TOPcon <sup>[10]</sup> Top/Rear contact <sup>[11]</sup>	SiOx/ doped poly-Si SiOx/ poly-Si(n-top, b-BT)	Metal AZO, Ag	Electron Electro/ Hole	25.3 19.2	718 707	42.5 33.4	82.8 81.2
	ISFH <sup>[12]</sup>	POLO(IBC)	SiOx/ doped poly-Si	Metal	Electron	24.3	727	41.6	80.2
	ECN <sup>[13]</sup>	Passivated emitter/ rear polysilicon	SiOx/ doped poly-Si	Metal	Electron	20.7	675	38.8	79.1
	NREL <sup>[3]</sup>	Poly-Si/SiO <sub>2</sub> /p-Si	SiOx/ poly-Si(or TCO)	Metal	Electron	21.5	693	39.6	78.4
	GI <sup>[14]</sup>	Poly-Si/SiO <sub>2</sub> /p-Si	SiOx/poly-Si	Metal	Electron	21.2	683	39.7	78.1
	ANU	TiO <sub>2</sub> or SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> <sup>[15]</sup> a-Si/MgF <sub>2</sub> <sup>[16]</sup>	TiO <sub>2</sub> or SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> a-Si/MgF <sub>2</sub>	Al/Ag Al	Electron	21.6 20.1	676 687	39.6 37.8	80.7 77.3
Hole Selective Contact(HSC) Solar Cell	ANU/ Berkeley/ EPFL <sup>[17]</sup>	Dopant-free asymmetric heterocontacts	a-Si/MoOx(p) - a-Si/LiF(n)	Metal	Electro/ Hole	19.4	716	37.1	73.2
	EPFL	Hetero-structure w/MoOx B-doped SiCx(p)	(i-a-Si)/MoOx SiOx/i-Si/SiCx(p)	TCO & Metal TCO/Ag(rear)	Hole Hole	22.5 20.4	725 695	38.6 37.2	80.4 79.1
	SKKU	HIT type CSC (i-a-Si/LiF, i-a-Si/MoOx)	i-a-Si/LiF, i-a-Si/MoOx	TCO & Metal	Electro/ Hole	17.1	690	33.62	73.5
	UNIST <sup>[18]</sup>	Back contact, MoOx, LiF	Dopant free back contact	Al	Electro/ Hole	15.4	561	36.8	74.6
	Berkeley <sup>[19]</sup>	MoOx/ITO, i-a-Si/n-a-Si/ITO	MoOx/ITO	Ag	Hole	14.3	580	37.8	65

### 전자선택형 접합(ESC) 태양전지의 특성향상 핵심 요소기술

전자선택접합(ESC) 태양전지의 특성향상을 통한 고효율화를 위해서는 크게 두 가지 분야에서 기술의 최적화를 이뤄내야 한다. 첫 번째로는 실리콘 웨이퍼 표면의 패시베이션 특성의 향상과 동시에 균일한 두께의 버퍼층(tunneling

layer)의 형성이 중요하며, 두 번째는 후면 다결정 실리콘(semi-insulating polysilicon, SIPOS)층 특성의 최적화를 꼽을 수 있다. 실리콘 산화막 버퍼층을 이용한 패시베이션 특성의 향상은 누설 전류(saturation current density,  $j_0$ )의 감소를 통해 개방전압( $V_{oc}$ )을 향상시킬 수 있으며, 균일한 버퍼층의 형성은 이후 ESC층의 grain크기의 균일도와 연결되어 그 부분의 특성에 기인하게 된다.

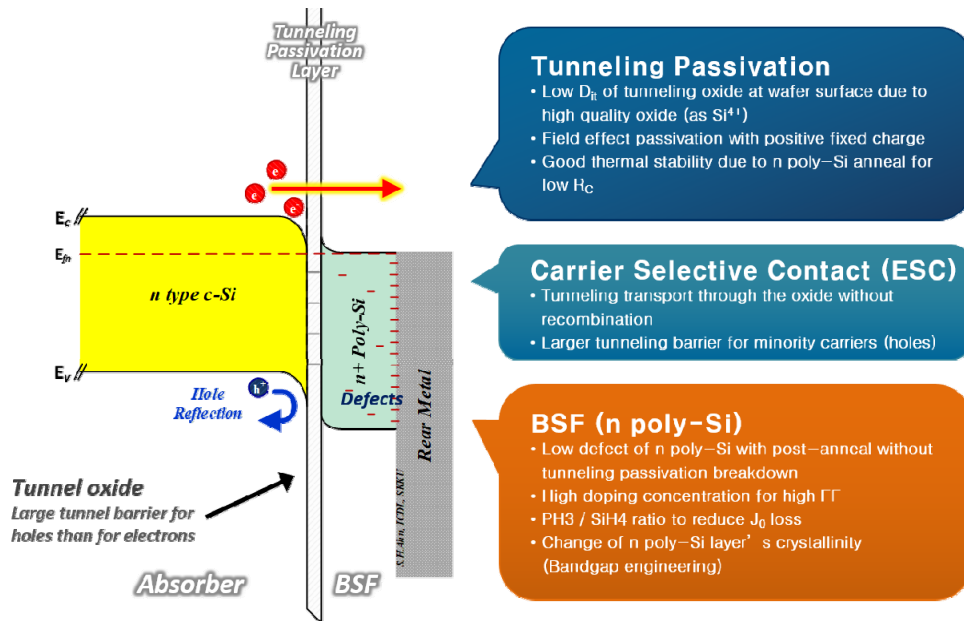


그림 6. 전하선택형 접합 태양전지의 특성 향상을 위한 핵심 기술

ESC층의 특성 향상은 도핑 농도와 열적 안정성, 결정화도 (crystallinity,  $X_c$ )의 인자에 기인하며 결과적으로 전하선택형 태양전지의 출력특성 중, 충전율(fillfactor)과 개방전압에 영향을 미치게 된다. 그림 6에 전자선택형 접합 태양전지의 특성 향상을 위한 핵심 기술을 정리 하였다.

### 실리콘 산화막(SiOx)를 이용한 표면 패시베이션 및 터널링 박막의 연구 동향

Fraunhofer에서 제안한 TOPCon 구조의 태양전지는 우수한 패시베이션 특성을 갖는 터널링 산화막을 적용하여 매우 낮은 누설전류( $J_0 < 10 \text{ fA/cm}^2$ )를 바탕으로 높은 개방전압과 충전율을 달성하였다( $V_{oc}=719\text{mV}$ ,  $FF=83.4\%$ ).<sup>[10]</sup> 터널링 산화막의 품질이 표면 패시베이션의 특성을 결정 짓기 때문에 각 연구기관들은 다양한 방법으로 실리콘 산화막을 우수한 품질과 균일한 두께로 형성하려는 연구를 수행 중이다.

그 방법으로는  $HNO_3$ , 오존 처리된  $DI-H_2O(DIO_3)$ 를 이용한 습식기반 공정과 UV/ $O_3$  혹은 플라즈마를 이용한 건식기반 공정으로 크게 나눌 수 있다. 제조 공정상의 비용이나 양산성 측면에서는 습식기반 공정이 건식기반 공정

에 비해 이점을 가진다고 볼 수 있으나, 건식공정으로 형성된 터널링 산화막과 실리콘 사이의 계면 특성이 습식공정으로 형성한 산화막에 비해 화학량론적(stoichiometric)으로 우수하기 때문에 열적 안정성에 있어서 우수하다고 보고되고 있다.<sup>[20]</sup> 또한, 건식공정으로 형성한 터널링 산화막은 계면에서 strain이 적게 일어나며, 산화막 하부에 Si-O-Si의 작은 결합각을 가지는 전이층(transition layer)의 형성이 줄어들어 박막의 스트레스가 줄어들고, Si-O 결합이 포화되어 높은 밀도(고온에서 형성한 산화막의 경우  $2.20\sim 2.24 \text{ g/cm}^3$ , UV/ $O_3$ 를 이용한 산화막은  $2.21\sim 2.25 \text{ g/cm}^3$ ,  $HNO_3$ 로 형성한 산화막은  $2.11 \text{ g/cm}^3$ )와 낮은 결합,<sup>[21]</sup> 화학량론적으로  $SiO_2$ 에 가까운 구조를 가지고 있다.

또한, 이후 설명하겠지만 터널링 산화막의 열적 안정성은 비정질 실리콘을 SIPOS 막으로 만들 때의 어닐링 공정에서 Si /  $SiO_2$  / ESC층 사이의 계면에서  $SiO_2$  / ESC층 사이의 불균일을 초래하게 되며 ESC층 내 grain의 크기 및 결합에 영향을 미치게 되어 전체적인 태양전지의 특성의 감소로 이어지게 되기 때문에 균일성과 패시베이션 특성의 향상 못지 않게 중요한 요인으로 작용한다.

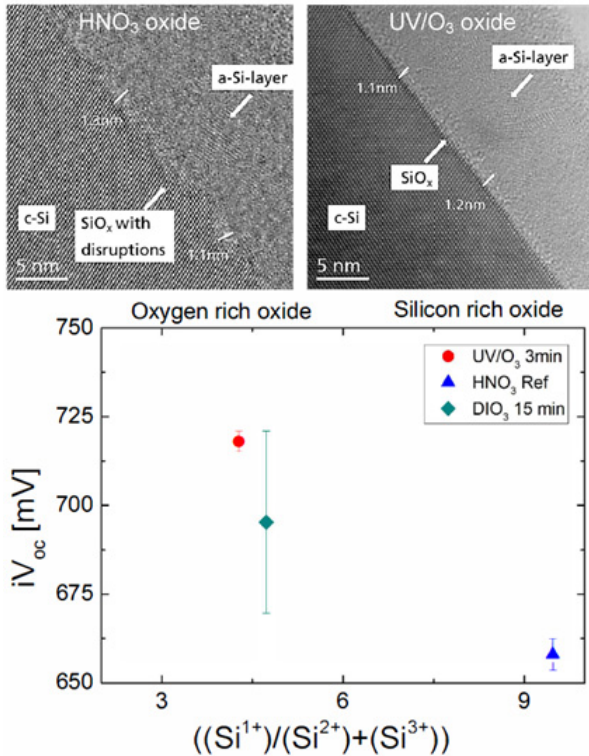


그림 7. 습식 및 건식공정을 이용한 터널링 산화막의 TEM 이미지와 Si-O의 분딩 구조에 따른  $iV_{oc}$  전압 특성 분석<sup>[20]</sup>

### 다결정 실리콘을 이용한 ESC층 형성 및 특성 향상에 대한 연구 동향

ESC층의 형성 및 특성 향상에 있어서는 박막의 도핑 농도인  $N_A$ (a-Si:H를 이용한 결정화의 경우  $PH_3/SiH_4$ 의 비율, 다결정 intrinsic 실리콘에 이온 주입법을 사용하는 경우는 implanted dose)와 결정화 공정의 최적화가 필요하다. 비정질 실리콘층을 증착한 이후 결정화를 통해 다결정

실리콘층을 형성하기 위해서는 고온 확산로를 이용한 어닐링 공정이 주로 사용되고 있다.

그림 8은 비정질 실리콘 증착 시, 도핑 농도와 이후 결정화를 위한 어닐링 공정의 온도 변화에 따른  $iV_{oc}$ 와 누설전류의 경향을 나타내고 있다. 도핑 농도가 중요해지는 이유는 ESC층과 실리콘 흡수체 사이의 일함수 차이로 인해 실리콘 계면에서 accumulation층(혹은 band bending)이 형성되는데, 이 층의 역할은 전자가 터널링 산화막 / 실리콘 계면으로 쉽게 이동하는 동안 정공이 터널링 산화막을 배리어로 느끼게 해 주며 결론적으로 전하의 선택성을 높여 주는 것이다. 또한, 다결정 실리콘 내의 phosphorus는 실리콘 흡수체로 확산되어 Auger 재결합을 감소시키는 역할을 수행하여 누설전류의 감소와 개방전압의 상승을 가져온다. 박막내의 도핑 농도가 최적 조건 이하로 떨어지는 경우는, 앞에서 언급한 accumulation층이 형성이 약해지고, quasi-Fermi 준위 분리(quasi-Fermi level splitting)가 감소되어 누설전류가 증가하며 개방전압이 하락하는 결과로 나타난다.<sup>[22]</sup>

어닐링 공정을 통해 ESC층을 형성하는 경우, 비정질 실리콘 박막을 증착한 이후 온도가 올라감에 따라 비정질 상태에서 박막 내에 존재하는 tensile 스트레스가 박막이 결정화 되면서 compressive 스트레스로 변화하기 때문에 특성에서 차이가 생기며, 스트레스가 바뀌는 요인으로는 annealing을 거치면서 터널링 산화막이 화학량론적으로  $SiO_2$ 에 가깝게 재조직화(reorganization)가 일어나기 때문으로 보고되고 있다.<sup>[23]</sup>

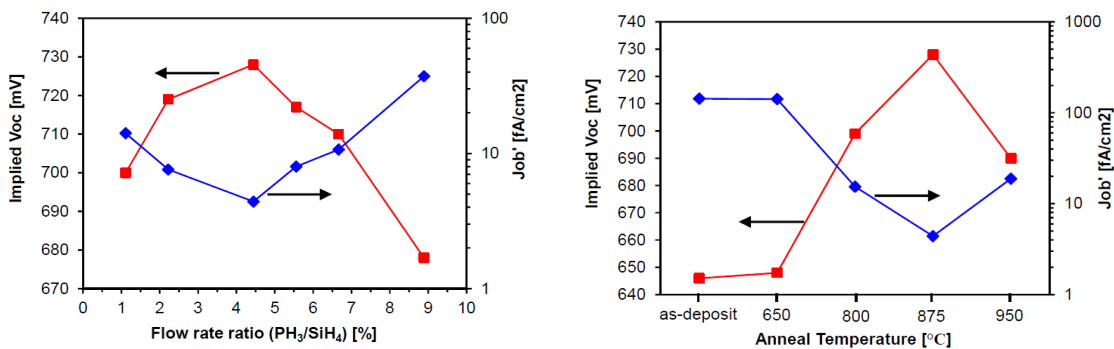


그림 8. ESC층의 도핑 농도( $PH_3/SiH_4$ )와 어닐링 온도의 가변에 따른  $iV_{oc}$ 와 누설전류의 경향<sup>[22]</sup>

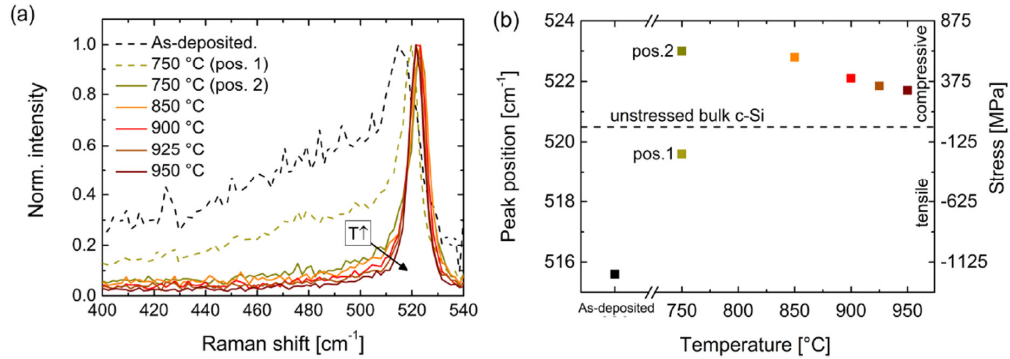


그림 9. 어닐링 온도에 따른 ESC층의 Phase 변화 및 박막 내 스트레스 분석<sup>[23]</sup>

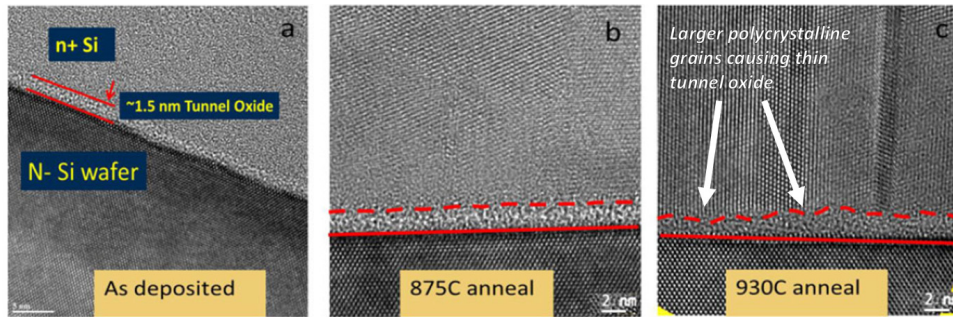


그림 10. 어닐링 온도에 따른 터널링 산화막 / ESC층 사이의 계면 변화를 나타내는 HREM(High-resolution transmission electron microscopy) 이미지<sup>[24]</sup>

하지만, 온도가 일정 수준 이상을 넘게 되면(그림 8의 오른쪽 그래프에서  $T > 875^{\circ}\text{C}$ ) 터널링 산화막이 그림 10에서 나타나는 것처럼, 약간 변형이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이 변형된 부분에서 다결정 실리콘 층은 더 커진 grain을 나타내고, 결과적으로 터널링 산화막을 더 얇게 만들게 된다. 이렇게 되면 홀의 터널링이 향상되는 결과를 가져와 전자의 선택성을 하락시키기 때문에  $iV_{oc}$  측면에서 감소가 일어난다.<sup>[24]</sup>

### 정공선택형 접합(HSC) 태양전지의 특성향상 핵심 요소기술

정공선택형 접합 태양전지의 특성향상에 필요한 핵심 요소기술을 그림 11에 나타내었다. 전자선택형 접합 태양전지와 터널링 역할을 담당해주는 버퍼층의 역할은 동일하지만, 선택적으로 정공을 수집할 수 있도록 역할을 하는 HSC층의 물질개발 및 특성 최적화에 대한 연구가 가장 활발하게 이뤄지고 있으며, 추가적으로 HSC층 위에 형성되

는 투명전도막의 증착 시의 데미지로 인한 손실을 최소화 하는 기술이 필요하다.

n-type 이중접합 실리콘 태양전지에서 emitter로 사용되는 p+ 비정질 실리콘 박막의 경우, 상대적으로 흡수계수가 높기 때문에 광학적 측면에서 손실이 생기게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 박막의 흡수계수가 우수한 물질을 적용하면 광학적 특성의 향상을 통한 효율 향상으로 이어질 수 있다. 그 대안으로 주목받은 물질이 전이금속산화물(transition metal oxide, TMO)이며, 관련된 연구의 적용의 경우 Faunhofer Institute, ANU, EPFL 등이 연구결과를 학계에 보고하고 있다.

전하선택형 실리콘 태양전지의 적용을 위한 TMO 물질의 적용에 있어서 특성을 결정하는 가장 중요한 인자는 TMO 물질과 실리콘의 접합 시 발생하는 band-offset인데,  $\Phi_{TMO-\gamma a-Si}$  or  $\Phi_{Si}$  간의 에너지 차이에 의해 발생하는 band-offset이 정공의 배리어를 결정하기 때문이다. 즉, TMO를 적용한 전하선택형 실리콘 태양전지의 특성 향상



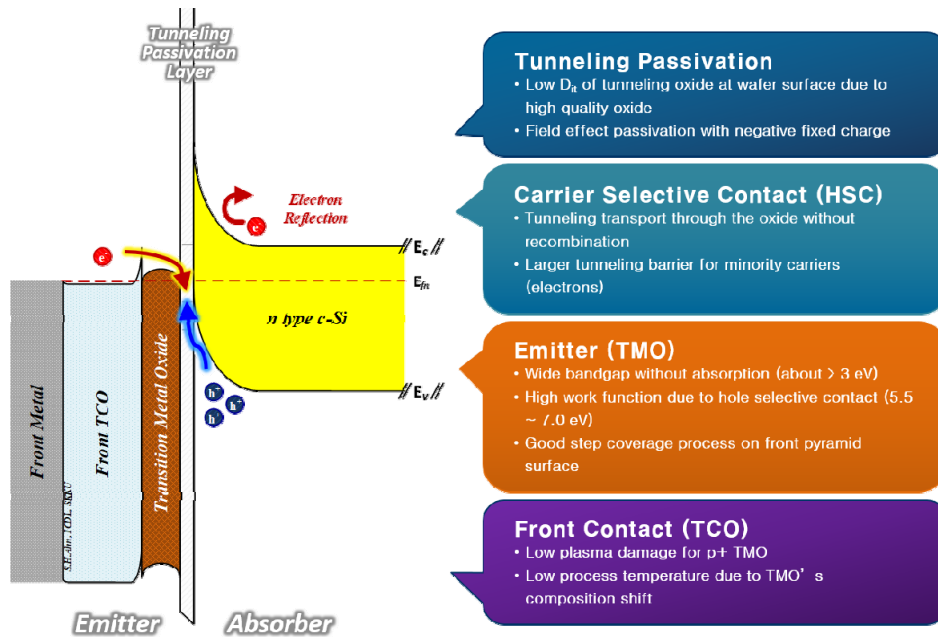


그림 11. 정공선택접합형 태양전지의 특성 향상을 위한 핵심 기술

을 위해서 TMO 물질의 일함수( $\Phi_{TMO}$ )는 높을수록, 접합물질의 이온화 에너지는 상대적으로 낮게 형성되어야 한다.

$$\Delta E = E_g - (\chi_{TMO} - \chi_{a-Si}) \quad (1)$$

위의 수식에서  $\Delta E$ 는 가전자대의 band-offset(혹은 barrier height)  $E_g$ 는 비정질 실리콘 박막의 광학적 밴드 갭이며,  $\chi_{a-Si}$ 와  $\chi_{TMO}$ 는 비정질 실리콘과 TMO의 전자친화

도(electron affinity)를 나타낸다. 즉, 일함수가 높은 TMO 물질을 사용할 경우, 실리콘과의 접합에서 발생하는 band-offset을 낮추어 이를 전하선택형 실리콘 태양전지에 적용할 경우 출력특성의 향상으로 이어지게 된다. 현재 학계에 보고되고 있는 HSC에 적합한 물질로는  $V_2O_5$ ,<sup>[25]</sup>  $CrO_3$ ,  $MoO_3$ ,<sup>[26-29]</sup>  $WO_3$ ,<sup>[30]</sup> 등이 제안되고 있는데, 후보군 중에서  $V_2O_5$ ,  $WO_3$ ,  $MoO_3$ 의 일함수가 상대적으로 높기 때문에 band-offset의 감소에 의한 특성 향상에 있어서 강

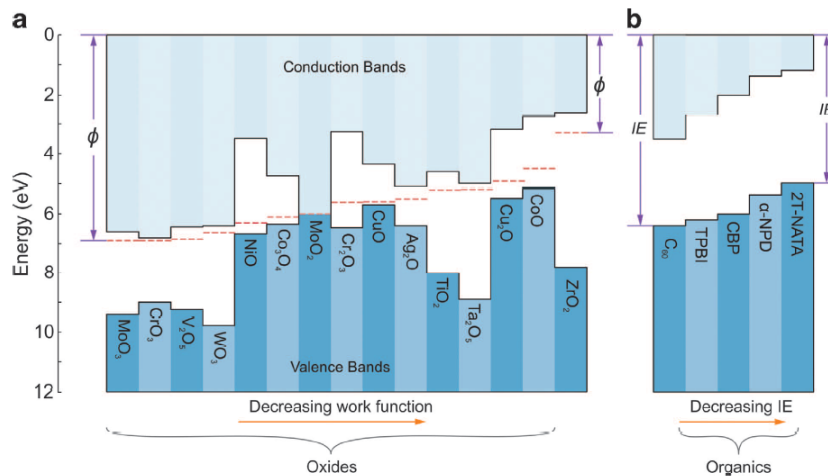


그림 12. 다양한 TMO 및 organic 물질의 에너지 레벨 및 일함수 분포<sup>[31]</sup>

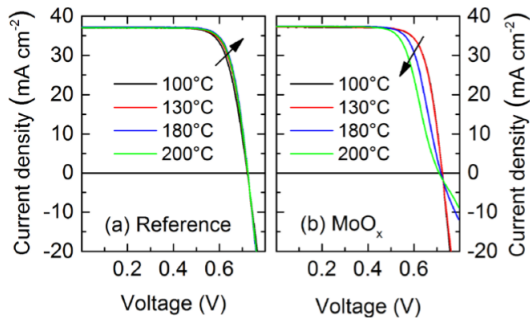


그림 13. 이종접합 태양전지와 MoO<sub>x</sub>를 적용한 태양전지의 어닐링 온도에 따른 충전율 경향성 변화<sup>[4]</sup>

점을 보이며, 선택적 전하 접합을 위한 TMO 물질로 상용화 가능성이 예상된다.

광학적 특성에 있어서 이점을 가지는 TMO 물질이지만 두께가 증가할 경우에 있어서 충전율이 70%대로 형성되는 'hole collection issue'가 일어나는데,<sup>[32]</sup> 이는 정공의 수집을 막아주는 장벽이 생겼기 때문이라고 밝혀지고 있다. Ballif 교수 연구팀의 연구결과에서 이 장벽의 원인은 어닐링 분위기와는 무관하며 온도의 상승에 따라 MoO<sub>x</sub> / TCO 사이의 중간층이 두꺼워지기 때문이라고 보고하고 있다. 이종접합 태양전지의 경우 어닐링 온도의 증가에 따라 패시베이션 특성의 증가와 전극의 전도도가 향상되기 때문에 충전율이 증가하는 경향을 보이지만, MoO<sub>x</sub>를 사용한 태양전지에서는 높은 온도의 어닐링은 정공의 수집을 막는 배리어를 형성하기 때문에 피해야 한다는 연구결과를 발표하였다.<sup>[4]</sup>

## 결론

최근의 국제적인 태양전지 생산 규모는 년 간 60 GW를 상회하고, 누적된 설치용량은 2017년 현재 약 250 GW이며, 지속적인 효율 향상 및 원가 절감으로 태양광모듈 가격은 0.4 \$/watt 이하까지 하락하였다. 이러한 변화 속에서 양산에 적용 가능성이 크면서도 기존의 기술을 뛰어넘을 수 있는 차별화된 차세대 전하선택형 실리콘 태양전지 기술의 개발이 필요하다.

실리콘 태양전지의 세계 최고 변환효율은 26.3%에 이르렀으나, 매우 복잡한 구조로 낮은 생산성과 원가 측면에서 어려움이 있는 상황이다. 때문에 복잡한 구조를 사용하지 않고도 고효율 달성이 가능한 태양전지 구조개발 및 제조 방법 개발이 가능한 차세대 전하선택형 실리콘 태양전지의 기반 기술 개발은 이후 그리드패리티의 달성을 한발 더 앞당기는 밑바탕이 될 것이라고 생각된다.

하지만, 기존의 태양전지와는 다르게 전하선택형 태양전지는 기존의 다이오드 이론, p-n 접합, 전하 생성과 재결합 등에 기존의 이론을 적용하는데 한계가 있기 때문에 신형 태양전지 구조의 이론적 재해석과 물리적 영향인자를 고려하여 원천 기술을 확보하고, 이를 통한 기술 한계 극복이 가장 필요한 부분이라고 볼 수 있다. 이를 위해서는 새로운 물질, 공정, 분석 및 평가, 소자설계 및 구현 그리고 이를 생산에 연계하기 위한 요소들의 유기적인 연구 개발 진행이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20173010012940).

## 참고문헌

- [1] J. Zhao et al., *Progress in Photovoltaics*, 7, Issue 6, pp. 471, 1999.
- [2] K. Yoshikawa et al., *Nature Energy*, 2, pp. 17032, 2017.
- [3] P. Stradins et al., *WCPEC-6 conference proceeding*, 2014.
- [4] J. Geissbuhler et al., *Appl. Phys. Lett.* 107, pp. 081601, 2015.
- [5] G. Nogay et al., *ACS appl. Mater. Interfaces*, 8, 51,

- pp. 35660, 2016.
- [6] J. Geissbuhler et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol.107, pp. 081601, 2015.
- [7] M. Taguchi et al., *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4, No. 1, pp. 96, 2014.
- [8] D. D. Smith et al., *40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Denver Colorado USA, 2014.
- [9] J. B. Heng et al., *IEEE J. Photovoltaics*, 5, pp. 82, 2015.
- [10] A. Richter et al., *EPVSEC-26*, 2016.
- [11] F. Feldmann et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 159, pp. 265, 2017.
- [12] F. Haase et al., *PVSEC-26 conference proceedings*, 2016.
- [13] M. K. Stodolny et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 158, pp. 24, 2016.
- [14] Y. Tao et al., *Prog. PV*, Vol 24, Issue 6, pp.830, 2016.
- [15] X. Yang et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 150, pp. 32, 2016.
- [16] Y. Wan et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, pp. 14671, 2016.
- [17] J. Bullock et al., *Nature Energy*, 1, pp. 15031, 2016.
- [18] H. Um et al., *Nano Lett.*, 16(2), pp. 981, 2016.
- [19] C. Battaglia et al., *Nano Lett.*, 14(2), pp 967, 2014.
- [20] A. Moldovan et al., *42nd IEEE PVSC conference proceeding*, 2015.
- [21] Y. Sugita et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, 35, No. 10, pp. 5437, 1996.
- [22] Y. Tao et al., *AIMS Materials Science*, 3(1), pp. 180, 2016.
- [23] J. Stuckelberger et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 158, pp. 2, 2016.
- [24] A. D. Upadhyaya et al., *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6, No. 1, pp. 153, 2016.
- [25] N. Espinosa et al., *Materials*, 4, pp. 169, 2011.
- [26] J. Bullock et al., *Appl. Phys. Lett.*, 105, pp. 232109, 2014.
- [27] J. Bullock et al., *Energy Procedia*, 77, pp. 446, 2015.
- [28] J. Gao et al., *Nano Lett.*, 11, pp. 3263, 2011.
- [29] S. I. Park et al., *Appl. Phys. Lett.*, 99, pp. 063504, 2011.
- [30] F. Li et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 95, pp. 877, 2011.
- [31] M. T. Greiner et al., *NPG Asia Materials*, 5, pp. e55, 2013.
- [32] C. Battaglia et al., *Appl. Phys. Lett.*, 104, pp. 113902, 2014.