

# 전하선택형 태양전지의 연구개발 동향

조은철 · 조영현\*\* · 이준신\*

전자전기공학부, 성균관대학교, 수원시, 16419

## Research and Development Trend of Carrier Selective Energy Contact Solar Cells

Eun-Chel Cho · Young Hyun Cho\*\* · Junsin Yi\*

School of Electronic & Electrical engineering, Sungkyunkwan University, Suwon-shi 16419, Korea

Received Apr 6, 2018; Revised Jun 19, 2018; Accepted June 20, 2018

**ABSTRACT:** The traditional silicon heterojunction solar cells consist of intrinsic amorphous silicon to prevent recombination of the silicon surface and doped amorphous silicon to transport the photo-generated electrons and holes to the electrode. Back contact solar cells with silicon heterojunction exhibit very high open-circuit voltages, but the complexity of the process due to form the emitter and base at the backside must be addressed. In order to solve this problem, the structure, manufacturing method, and new materials enabling the carrier selective contact (CSC) solar cell capable of achieving high efficiency without using a complicated structure have recently been actively developed. CSC solar cells minimize carrier recombination on metal contacts and effectively transfer charge. The CSC structure allows very low levels of recombination current (eg,  $J_0 < 9 \text{ fA/cm}^2$ ), thereby achieves high open-circuit voltage and high efficiency. This paper summarizes the core technology of CSC solar cell, which has been spotlighted as the next generation technology, and is aiming to speed up the research and development in this field.

**Key words:** Carrier selective contact solar cells, heterojunction, electron selective contact, hole selective contact

### 1. 서론

지난 수십 년 동안 결정질 실리콘 태양전지는 변환효율, 가격, 안정성, 수명 등의 장점을 기반으로 태양광 시장을 과점하여 왔다. 최근 n형 실리콘 기반에 후면전극형(IBC, interdigitated back contact) 구조와 이종접합(heterojunction)을 결합한 태양전지는 26.7%의 효율을 기록하였다<sup>1)</sup>. 전통적인 실리콘 태양전지의 구조는 수광면에 전극과 pn 접합, 후면에 전류의 수집을 위한 p-p+ 접합이 형성되어 있으며, IBC 태양전지 구조의 장점은 전면이 전극이 없고 광전류의 재결합을 방지하는 절연체 박막이 형성되어 있다. IBC의 26.7%의 높은 고효율은 “passivated contact” 또는 “전하선택형접촉 태양전지(CSC: Carrier Selective Contact)”이라 부르는 이종접합 기술에 기인하며, 이종접합은 실리콘 표면의 재결합을 방지하는 intrinsic 비정질 실리콘과 광에 의해 형성된 전하-정공을 이동하게 하는 도핑된 비정질 실리콘으로 구성된다. 이종접합과 후면전극 태양전지는 매우 높은

개방전압을 보이나, 도핑된 비정질 실리콘의 기생적인 광의 흡수와 후면에서 이미터와 베이스를 형성하는 공정에 기인하는 공정의 복잡함이 해결해야 하는 문제이다. 이를 해결하기 위해 복잡한 구조를 사용하지 않고도 고효율 달성이 가능한 태양전지 구조, 제조방법 그리고 이를 가능하게 하는 새로운 물질에 대한 연구개발이 최근에 활발히 시작되었다.

CSC에 대한 개념은 유기소자에서 개발이 시작되었으며, 지금은 결정질 실리콘과 perovskite 태양전지에서도 관심을 받고 있다. 실리콘 태양전지의 이론적인 효율에 접근하기 위해 해결해야 할 여러 사항 중의 하나는 금속접촉 영역에서 소수 반송자의 재결합을 방지하는 것이다. 금속/실리콘 접촉 영역의 재결합은 고효율화를 위한 가장 큰 제한 요소이다. CSC 태양전지는 금속접촉에서 전하의 재결합이 최소화되고 효과적으로 전하를 이송시킨다. 실리콘과 금속전극이 분리된 CSC 구조는 재결합 전류 매우 낮은 수준으로(예,  $J_0 < 9 \text{ fA/cm}^2$ ), 높은 개방전압과 고효율 달성을 가능하게 한다.

CSC의 이해를 돕기 위해 Fig. 1에 태양전지 구조에 따른 에너지 밴드 다이어그램을 도식화 하였다. 에너지밴드에서 보듯이

\*, \*\*Corresponding authors: junsin@skku.edu, yhcho64@skku.edu

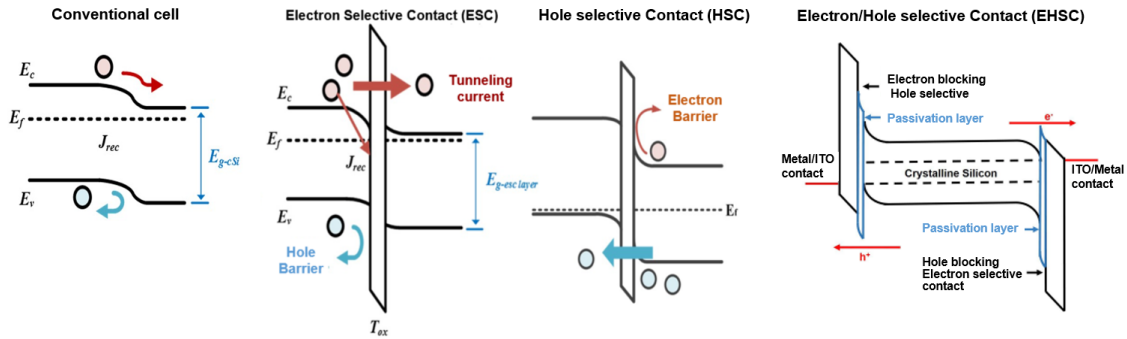


Fig. 1. Energy band diagram of carrier selective contact solar cells

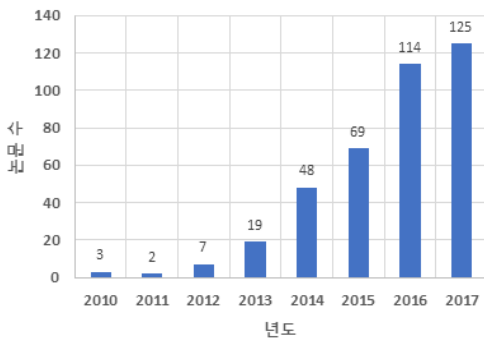


Fig. 2. Published number of CSC papers per year from 2010 on google scholar

전자 또는 정공 한쪽에 대해 barrier height에 의한 움직임 제어 하거나 blocking 또는 tunneling을 통해 선택적으로 전하를 수집할 수 있는 구조를 통틀어 CSC 태양전지라 하고, 전자에 대한 선택형 접촉을 ESC(electron selective contact), 정공에 대한 선택형 접촉을 HSC(hole selective contact), 그리고 전자와 홀 양쪽 모두에 대한 선택형접촉을 EHSC(electron and hole selective contact)으로 정의한다. CSC 형태의 태양전지는 빛에 의해 태양 전지 내부에 생성된 전자와 정공을 전극으로 분리하는데 있어서 전자 또는 정공 분리에 유리한 물질을 사용하여 좀 더 효율적으로 전자와 정공을 분리할 수 있다. 전자의 선택적인 이동을 위한 전자-선택층(ETL: Electron-Transfer Layer)은 work function이 낮은 물질로 금속, 산화금속, 알칼리 희토류 금속염(alkaline rare earth salt) 등이 사용되며, 정공의 선택적인 이동을 위한 홀-선택층(HTL: Hole-Transfer Layer)은 work function이 크며 정공에 대한 전도도를 갖는 천이금속산화물(TMO: Transition metal oxide, 예 MoO<sub>x</sub>, WO<sub>x</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>x</sub>)과 PEDOT:PSS, graphene, carbon nanotube 등이 연구되고 있다<sup>2)</sup>.

Fig. 2는 google scholar에서 “carrier selective contacts”으로 검색한 논문의 수로, 관련된 연구가 지속적으로 증가함을 보여 준다. 본 논문에서는 실리콘 태양전지의 고효율화를 달성할 수 있는 차세대 기술로 각광을 받으며, 최근 연구개발에 속도를 높이고 있는 CSC 태양전지의 핵심 기술을 정리하였다.

## 2. CSC 태양전지

CSC 태양전지에 사용될 수 있는 물질은 ① 비정질 실리콘 ② Metal-Insulator 또는 Metal-Semiconductor-Insulator ③ SIPOS (P-doped Semi-Insulating Polycrystalline Silicon), ④ Poly-Si ⑤ TMO 등이 있다. Table 1은 CSC 구성물질, 선택전하 특성(ESC, HSC 또는 ESC/HSC)과 태양전지 특성을 정리하였다.

비정질 실리콘을 이용한 heterojunction은 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) 태양전지로 IBC 구조에서 26.7% 효율을 기록하였다<sup>1,3)</sup>.

MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 구조는 1970년대부터 연구가 진행되었으며, 1990년대에는 열적안정성과 낮은 Voc가 보고되었다. 2010년대에는 금속의 work function에 따른 ESC과 HSC 특성에 대해 연구되었다. ESC에는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n<sup>+</sup>-Si에서 변환효율 21.7%와 673 mV를 보고하였고, AlO<sub>x</sub>의 두께가 0.24nm보다 두꺼우면 tunneling이 줄어 높은 직렬저항이 발생한다<sup>4)</sup>. ITO/SiO<sub>2</sub>/n-Si 구조에서 재결합전류 92 fA/cm<sup>2</sup>, 접촉저항 12 mΩcm<sup>2</sup>을 보고하였다<sup>5)</sup>.

1980년대에 Yablonovitch는 SIPOS를 이용한 ESC에서는 재결합 전류 20 fA/cm<sup>2</sup>, Voc 720 mV, 낮은 FF를 보고하였다<sup>6)</sup>.

SiO<sub>2</sub>/Poly-Si에 대한 연구는 Fraunhofer ISE (FhISE), ISFH, ANU, GIT, NREL ECN 등에서 2013년부터 Poly-Si을 이용한 CSC에 대해 지속적으로 보고가 진행되고 있으며, SunPower사의 IBC에서도 SiO<sub>2</sub>/Poly-Si 사용되었다고 알려져 있으나 자세한 사항은 보고되고 있지 않다. 독일 Fraunhofer에서는 태양전지에 확산된 pn접합, 수광면과 후면에 금속전극이 있는 형태로는 최고의 효율인 25.7%을 보고하였으며<sup>7)</sup>, 도핑을 사용하지 않고 수광면과 후면에 CSC을 이용한 태양전지에 대한 연구를 시작하였다<sup>8)</sup>. ISFH에서는 IBC 구조에 ESC와 HSC으로 poly-Si을 사용하여 n형 실리콘 기판으로 25.7%<sup>9)</sup>, p형 실리콘 기판으로 26.1%를 2018년 2월에 홍보하였으며 2018년 SiliconPV와 SNEC에서 관련된 내용을 공개하였다<sup>10)</sup>.

최근에는 터널 산화막을 이용한 전자의 선택적 수집뿐만 아니라, TMO를 이용한 정공의 선택적 수집 연구도 활발히 이루어

**Table 1.** Constituent materials and solar cell characteristics of carrier selective solar cells

Institute	name	Passivated/Transfer layer	Contact type	Eff (%)	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Ref
Kaneka	IBC-HIT	i-a-Si / doped a-Si	ESC/HSC	26.7	738	42.7	84.9	[1,3]
Panasonic	HIT 양면접합	i-a-Si / doped a-Si	ESC/HSC	24.7	750	39.5	83.2	[10]
FhISE	TOPcon Front/rear CSC	SiOx / doped poly-Si	ESC	25.8	724	42.9	83.1	[7]
		SiOx / poly-Si (front, rear)	ESC/HSC	19.2	707	33.4	81.2	[8]
ISFH	POLO (IBC)	SiOx / poly-Si, n-type Si	ESC/HSC	25.0	722	41.9	82.6	[9]
		SiOx / poly-Si, p-type Si		26.1	727	42.6	84.3	[10]
ECN	PERPOLY	SiOx / doped poly-Si	ESC	21.3	679	39.2	80.9	[11]
NREL	-	SiOx / poly-Si (or TCO)	ESC	21.5	693	39.6	78.4	[12]
GIT	-	SiOx / poly-Si	ESC	21.2	683	39.7	78.1	[13]
ANU	-	TiO <sub>2</sub> or SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> a-Si/MgF <sub>2</sub>	ESC	22.1	674	39.8	82.5	[14]
				20.1	687	37.8	77.3	[15]
ANU /Berkeley /EPFL	Dopant-free asymmetric heterocontacts	a-Si/LiF, a-Si/MoOx a-Si/LiF, a-Si/TiOx/MoOx	ESC/HSC	19.4	716	37.1	73.2	[16]
				20.7	706	38.4	76.2	[17]
Berkeley	-	SiOx/MoOx	HSC	14.3	580	37.8	65	[18]
EPFL	-	(i-a-Si) / MoOx	HSC	22.5	725	38.6	80.4	[19]

지고 있다<sup>2)</sup>. HSC을 이용한 태양전지는 아직까지 ESC 보다는 효율이 조금 더 낮은 22.5% 정도가 최고 기록이다<sup>14)</sup>.

아래 절에서는 ESC의 대표적인 구조인 SiO<sub>2</sub>/poly-Si과 HSC의 대표적인 구조인 a-Si/TMO의 특성과 연구개발 결과를 정리하였다.

**2.1 Poly-Si을 이용한 ESC 개발 동향**

ESC의 대표적인 물질은 poly-Si으로 2013년부터 다양한 구조와 특성에 대해 보고되고 있다<sup>7-13)</sup>. 그 외에 연구되는 ESC 물질은 TiO<sub>2</sub><sup>14)</sup>, MgF<sub>2</sub><sup>15)</sup>, LiF<sup>16)</sup>이 연구되고 있다. TiO<sub>2</sub>을 이용한 CSC은 최고 효율 22.1%을 보고하였다.

Poly-Si을 이용한 CSC은 매우 얇은 터널 산화막(tunnel-oxide, Tox)을 열산화 또는 화학적 산화막으로 형성하고, PECVD 또는 LPCVD로 비정질 실리콘을 증착한 후 850°C 이상의 고온에서 열처리를 하여, poly-Si으로 결정화를 시키 후, 450°C 정도의 forming gas 열처리로 CSC 특성을 향상시킨다. n형 실리콘에 형성된 1.5nm 이하의 매우 얇은(Tox: Tunnel-oxide)은 광생성된 전자와 정공의 재결합을 방지(passivation)하고, Quantum-tunneling 현상으로 전자를 ETL인 P-doped poly-Si층으로 이송시킨다. FhISE는 전면에 boron doped selective emitter, 후면에는 Poly-Si CSC을 적용한 4cm<sup>2</sup> 크기의 셀로 25.7%의 효율과 724 mV의 Voc를 달성하였다<sup>7)</sup>. FhISE에서는 이 구조를 TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)으로 명명하였다. 추가적인 TOPCon 구조의 특징은 다양한 저항의 n형 실리콘 기판을 사용할 수 있다는 점이다. p형 실리콘 잉곳에 대비하여 n형 실리콘 잉곳은 결정성장중에 다양한 저항의 기판이 생산된다. 다른 n형 실리콘 기판을 이용한 IBC 또는 PEC

구조는 한정된 비저항의 기판을 사용하여 태양전지가 생산되고 있다. TOPCon 구조에서는 전류의 흐름이 한 방향으로 흐르기 때문에 기판의 저항에 영향을 받지 않는다. Fraunhofer에서는 1~10 Ωcm 기판을 이용하여 제작한 TOPCon의 셀 특성이 Voc >715 mV, FF > 81.5%, 변환효율 ≥ 25% 이상임을 보고하였다. FhISE에서는 p형 실리콘 기판을 사용하고 pn접합을 형성하지 않고, 전면에 SiOx/poly-Si(n형)과 후면에 SiOx/ poly-Si(p형)을 이용한 태양전지를 개발하고 있다<sup>8)</sup>. 빛을 수광하는 태양전지의 전면에 사용된 Poly-Si의 기생적인 광의 흡수에 기인한 광전류의 저하가 문제이나, Voc 710 mV, FF >81% 이 가능함을 보고하였다.

ISFH에서는 IBC 태양전지의 CSC 접합으로 SiOx/Poly-Si을 사용하여 POLO (POLysilicon on Oxide)라고 명명하였다. 이 구조의 주요 특징은 상대적으로 두꺼운 2~3 nm 두께의 산화막을 성장시킨 후, 1,000°C 이상의 고온 열처리 공정에서 산화막에 pinhole을 형성하여 표면 passivation과 전하 이동에 이용하였다. ETL과 HTL로 사용되는 poly-Si층은 LPCVD에 의해 증착한 후, P와 B의 이온주입으로 도핑농도를 정밀하게 조정하였다. ISFH에서 보고된 POLO구조는 Table 2와 같이 CSC을 평가하는 주요 인자인 재결합전류 밀도(Joe, recombination current)와 접촉저항이 가장 우수한 특성을 보여 준다.

**Table 2.** Poly-Si's key factor comparison

Structure	Factor	Joe (fA/cm <sup>2</sup> )	Contact Resistance (mΩcm <sup>2</sup> )
POLO	poly-Si (n-type Si)	1.0	10.4
	poly-Si (p-type Si)	4.5	10.0
TOPCon	poly-Si (n-type Si)	6.67	10.4

P 도핑된 n형 poly-Si는 우수한 Voc를 보여주나, B 도핑된 p형 poly-Si는 blistering과 nano-pinhole 형식으로 소자에서 높은 재결합 밀도와 낮은 Voc를 보여준다. B 도핑된 비정질 실리콘은 850°C 이상의 고온 열처리를 하면, 도핑된 B는 쉽게 확산되어 Si기판과 SiO<sub>2</sub>/poly-Si 계면에 집적(aggregation)되고, poly-Si 입자계면에서는 분리(segregation)된다. 이는 SiO<sub>2</sub>막의 열화와 파열을 야기한다<sup>12)</sup>. 비정질 실리콘에 포함된 수소는 열처리 과정에서 박막의 blistering이 발생할 수 있어, 약 300°C에서 증착되는 PECVD보다는 600°C에서 증착되는 LPCVD 박막의 수소 함량이 적어 blistering을 최소화할 수 있다.

## 2.2 MoOx을 이용한 HSC 개발 동향

호주국립대학 ANU에서 MoOx, WOx 등의 천이형 금속 산화물 TMO 물질들이 연구 개발에서 시작하여, Berkeley와 EPFL 등에서도 연구가 진행되고 있다. 태양전지 제조시에 p형 층의 형성을 위한 boron의 도핑이 필요하나, boron 도핑 공정은 공정비용이 높다. HSC은 p형 층의 형성을 위한 boron의 도핑을 대체할 수 있으며, 대표적인 물질은 MoOx이다.

n형 실리콘 기판위에 MoOx을 증착시킨 MoOx/Si 태양전지는 580 mV, Jsc 37.8 mA/cm<sup>2</sup>, FF 65%, 변환효율 14.3%을 보여주었다<sup>18)</sup>. 효율저하의 주요 원인은 MoOx의 열악한 표면 passivation 특성에 기인한다. 실리콘 계면에 비정질 실리콘(i-s-Si:H)을 삽입하여 표면재결합을 향상시킨 태양전지는 개방전압이 711 mV 향상되고, 전류 밀도가 1.9 mA/cm<sup>2</sup> 향상되어 변환효율이 18.8%로 향상되었으나, FF가 67.2%로 낮아 소자의 효율을 제한하였다<sup>19)</sup>. MoOx/i a-Si:H 소자는 투명전도막과 금속 전극 형성후 200°C 정도에서 열처리를 진행하며, MoOx와 투명전도막 사이에 층간 intermixing이 발생하며 소자의 특성이 저하됨을 발견하였다. MoOx/a-Si:H의 효율 향상은 열처리 온도를 200°C에서 130°C로 낮추어, FF를 80% 이상으로 향상시켰다<sup>20)</sup>. MoOx/i a-Si:H/n-Si 기판/i a-Si:H/n<sup>+</sup> a-Si:H 소자의 최고 특성은 Voc 725 mV, Jsc 38.6 mA/cm<sup>2</sup>, FF 80.36%, 변환효율 22.5%이다<sup>21)</sup>.

MoOx를 비롯한 TMO를 이용한 HSC의 효율을 최대화하기 위해서는 TMO 박막의 work function을 높은 수준으로 유지하고(> 6 eV), 전도도, 계면의 passivation 및 접촉저항의 개선이 필요하다.

## 2.3 ESC/HSC을 동시에 적용한 태양전지

ESC 또는 HSC을 따로 적용하는 CSC 구조 외에 ESC와 HSC을 동시에 CSC 태양전지를 구현하는 것도 가능하다. 앞서 언급한 FhISE에서의 SiO<sub>x</sub>/poly-Si(n형)과 후면에 SiO<sub>x</sub>/poly-Si(p형)을 이용한 구조<sup>8)</sup>외에 ANU/Berkeley/EPFL 연구진의 공동 연구로 MoO<sub>x</sub>/a-Si:H(i)/n-Si/a-Si:H(i)/LiF<sub>x</sub> 구조로 실리콘에 도핑을 하지 않은 태양전지를 제조하였다<sup>16)</sup>. Work function이 큰

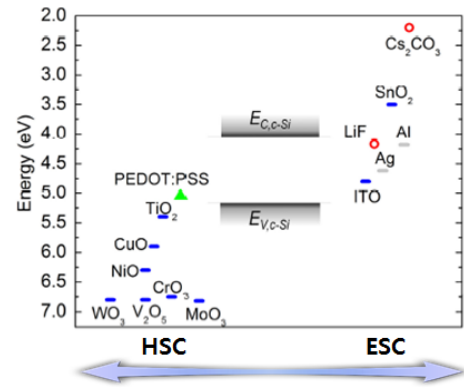


Fig. 3. Materials applicable to carrier selective contact

MoO<sub>x</sub>( $\approx 5.7$  eV)을 HTL 물질로, work function이 작은 LiF<sub>x</sub>( $\approx 2.87$  eV)을 ELT 물질로 사용하였다. 삽입된 a-Si:H(i) 층은 결정질 실리콘 표면의 재결합을 낮추어 Voc를 716 mV까지 제공한다. a-Si:H(i) 층이 없는 ESC와 HSC의 변환효율은 11.3%와 13.4%로, 실리콘 계면의 passivation 중요성을 알려준다. ETL에 1.5 nm의 TiO<sub>x</sub>층을 삽입한 a-Si:H(1.5 nm) TiO<sub>x</sub>(0.6 nm) LiF<sub>x</sub>/Al 소자는 접촉저항의 증가없이 300도의 열처리시에 Voc의 변화가 거의 없는 높은 열적안정성을 보여준다. 기존의 ETL 구성인 a-Si:H/LiF/Al은 상온에서 열처리 온도가 증가함에 따라 Voc의 급격한 감소를 보여준다. ESC와 HSC를 함께 적용한 MoO<sub>x</sub>/a-Si:H(i)/n-Si/ a-Si:H(i)/TiO<sub>x</sub>/LiF<sub>x</sub> 소자는<sup>17)</sup> 새로운 구조에서는 확산과 전극 형성 등 고온 공정이 필요 없어 잠재적으로 좋은 태양전지 구조로 생각되나 아직까지는 단위공정, 물질 및 소재 등의 요소 기술개발이 필요하다. Fig. 3에 CSC에 적용 가능한 물질들을 좌측에 HSC, 우측에 ESC 물질을 정리하였다.

## 3. 국내외 연구 동향

유럽 EPFL 중심으로 12개 기관이 “Double side contacted cells with innovative carrier-selective contacts”이란 초대형 연구과제 수행을 2016년 10월부터 2019년 9월까지 수행하고 있다. 이 연구과제는 실리콘의 잠재력을 최대화하고 기존의 생산라인을 개선하거나 미래의 생산라인에서 활용 가능한 CSC 태양전지를 개발한다. 컨소시엄에서는 경쟁력있는 원가와 시생산 준비성을 증명하고, 대면적 셀에서 변환효율 25.5%, 모듈에서 22% 이상을 개발하기 위해 산학연 협력체를 구성하였다. 본 연구는, 일사량에 따라 다르지만, 균등화 전력 비용(LCOE: Levelized Costs of Electricity) 0.04-0.07 \$/kWh를 달성하여 태양광 발전이 가장 저렴한 전력원중의 하나가 되는 핵심요소를 제공하고, 기후환경 변화 대응에 공헌하며 유럽에서의 태양광 연구, 기술 개발, 생산기반 확보의 기반 제공을 목표로 한다.

그림 4는 네덜란드 ECN 중심으로 6개 기관이 진행하는 프로젝트의 구조를 보여준다. COMPASS (COMPetitive PASSivating

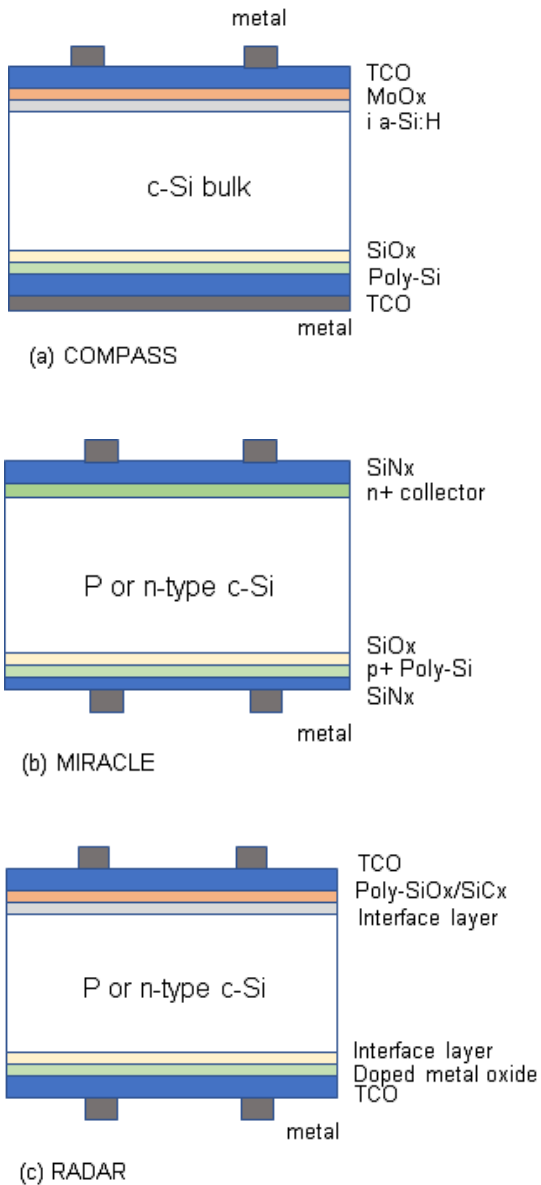


Fig. 4. CSC cell structures studied in Netherlands

contact technology for PV) 프로젝트도 네덜란드내의 산학연 프로젝트를 통해 CSC 물질의 지식과 생산 공정 강화를 목표로 한다. COMPASS 프로젝트는 전면의 HSC으로 MoOx/a-Si:H 으로, 후면의 ESC은 SiOx/poly-Si의 개발과 적용을 통해 23% 이상의 태양전지 개발을 진행하고 있다. MIRACLE (Material Independent Rear pAssivated Contact soLar cEll)은 실리콘 기판이 n형 또는 p형에 무관하게 23%의 효율을 달성하고자 하는 bifacial 태양전지 개발과제이다. RADAR (tRansparent pAssivating contact Design for Advanced solaR cells)는 변환효율 24% 이상의 Bifacial 태양전지를 개발하는 과제로 투과도가 높고 CSC 특성과 passivation이 우수한 도핑된 금속산화물과 poly-SiCx 또는 poly-SiOx를 개발할 예정이다. 이 물질들은 bifacial 태양전지의 전, 후면에 적용될 예정이다.

국내에서는 고려대 주관의 “면적 100 cm<sup>2</sup> 초고효율(>26%) 실리콘 웨이퍼 기반 태양전지 기술 개발” 과제로 ESC의 기술개발 과제를 진행하였다. 이 과제는 poly-Si을 이용한 ESC 태양전지 개발을 목표로 한다. 성균관대학교에서는 “고효율 결정질 실리콘 태양전지용 전하선택접촉 기술개발”과제를 10개 산학연 기관과 ESC, HSC 및 ESC/HSC 태양전지 개발을 목표로 협업하고 있다. 과제의 목표는 CSC 태양전지 변환효율 24% 이상의 기술 개발, CSC용 새로운 전자수송, 홀수송 재료개발 및 전하선택형접촉 신규 물질 개발 및 CSC 태양전지 6인치(156 mm × 156 mm)급 산업화 핵심 기반 기술 확보를 목표로 한다.

#### 4. 결론

기존의 태양전지는 p-n 접합에 의한 다이오드 이론, 전하 생성과 재결합을 이용하여 해석하고 있다. 새로운 CSC 태양전지는 기존의 이론을 적용하는데 한계가 있기 때문에 CSC 태양전지 구조의 이론적 재해석과 물리적 영향인자를 학습하여 원천 기술을 확보하고 이를 통한 기술 한계 극복이 필요하다. 이를 위해서는 새로운 물질, 공정, 분석 및 평가, 소자설계 및 구현 그리고 이를 생산에 연계하기 위한 요소들의 유기적인 연구 개발 진행이 필요하다. CSC 태양전지 구조의 단계적 과제는 전하들의 원활한 이동을 위하여 표면재결합을 방지하는 surface passivation 기술과 전하선택형 접촉층 형성 기술 등이 있다.

ETL과 HTL을 이용한 CSC 태양전지는 HIT 또는 IBC-HIT 구조와 같이 도핑을 사용하지 않는 태양전지의 구현과 함께 고효율 달성이 가능하다. 아직 ETL과 HTL를 이용한 CSC 분야의 태양전지 효율이 도핑을 사용한 태양전지에 비해 효율이 낮으나, 많은 연구자들이 연구개발을 진행하는 유망한 분야이다.

본 리뷰는 poly-Si와 MoOx를 이용한 ESC와 HSC 태양전지의 개발 현황과 주요 개발 이슈를 정리하였다. 본 리뷰를 통해 ESC, HSC 및 CSC에 대한 이해도를 높이고 연구개발을 촉진하여, CSC 분야의 연구개발이 좀 더 활성화되기를 기원한다.

#### 후 기

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

#### References

1. M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, Ewan D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, A. W. H. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 50)”. Prog. Photovolt., Vol. 25, No. 7, pp. 668-676, 2017.

2. P. Gao, Z. Yang, J. He, J. Yu, P. Liu, J. Zhu, Z. Ge, J. Ye, "Dopant-Free and Carrier- Selective Heterocontacts for Silicon Solar Cells: Recent Advances and Perspectives", *Advanced Science*, 1700547, 2017.
3. 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%". *Nat Energy*. 2, 17032, 2017.
4. D. Zielke, J. Hendrik Petermann, F. Werner, B. Veith, R. Brendel, J. Schmidt, "Contact passivation in silicon solar cells using atomic-layer-deposited aluminum oxide layers", *Physica Status Solidi (RRL) Rapid Research Letters*, Vol. 5, No. 8, pp. 298, 2011.
5. D. L. Young, W. Nemeth, S. Grover, A. Norman, H. Yuan, B. Lee, V. LaSalvia, P. Stradins, "Carrier Selective, Passivated Contacts for High Efficiency Silicon Solar Cells based on Transparent Conducting Oxides", *Energy Procedia*, 55, 733, 2014.
6. E. Yablonovitch, T. Gmitter, "A 720 mV open circuit voltage SiOx:c-Si:SiOx double heterostructure solar cell", *Appl. Phys. Lett.* 47, 1211, 1985.
7. A. Richter, J. Benick, F. Feldmann, A. Fell, M. Hermle, S. W. Glunz, "n-Type Si solar cells with passivating electron contact: identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation". *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*. 173, 96, 2017.
8. F. Feldmann, C. Reichel, R. Müller, M. Hermle, The application of poly-Si/SiOx contacts as passivated top/rear contacts in Si solar cells, *Sol. Energy mater. and Sol. cell*, 159, 265, 2017.
9. F. Haase1, F. Kiefer, S. Schäfer, C. Kruse1, J. Krügener, R. Brendel, R. Peibst, "Interdigitated back contact solar cells with polycrystalline silicon on oxide passivating contacts for both polarities", *Jpn. J. Appl. Phys.* 56 08MB15, 2017.
10. ISFH 홈페이지, <https://isfh.de/en/26-1-record-efficiency-for-p-type-crystalline-si-solar-cells/>
11. M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, E. Maruyama, 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer, *IEEE J. of Photovoltaics*, Vol. 4, No. 1, pp. 96, 2014.
12. M. K. Stodolny, J. Anker, B. L. J. Geerligs, G. J. M. Janssen, B. W. H. van de Loo, J. Melskens, R. Santbergen, O. Isabella, J. Schmitz, M. Lenes, J. Luchies, W. M. M. Kessels, I. Romijn, "Material properties of LPCVD processed n-type polysilicon passivating contacts and its application in PERPoly industrial bifacial solar cells", *Sol. Energy mater. and Sol. cell*, 124, 635, 2017.
13. W. Nemeth, V. LaSalvia, M. R. Page, E. L. Warren, A. Dameron, A. G. Norman, B. G. Lee, D. L. Young, P. Stradins, "Implementation of Tunneling Pasivated Contacts into Industrially Relevant n-Cz Si Solar Cells", 42nd IEEE PVSC, 2015.
14. Y. Tao, V. Upadhyaya, C.-W. Chen, A. Payne, E. L. Chang, A. Upadhyaya, A. Rohatgi, "Large area tunnel oxide passivated rear contact n-type Si solar cells with 21.2% efficiency", *Prog. in Photovol.*, Vol. 24, No. 6, pp. 830-835, 2016.
15. X. Yang, K. Weber, Z. Hameiri, S. De Wolf, "Industrially feasible, dopant-free, carrier-selective contacts for high-efficiency silicon solar cells", *Prog. Photovol.*, Vol. 25, No. 11, pp. 896 2017.
16. Y. Wan, C. Samundsett, J. Bullock, T. Allen, M. Hettick, D. Yan, P. Zheng, X. Zhang, J. Cui, J. McKeon, A. Javey, A. Cuevas, "Magnesium Fluoride Electron-Selective Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, No. 23, pp. 14671-14677, 2016.
17. J. Bullock, M. Hettick, J. Geissbuhler, A. J. Ong, T. Allen, C. M. Sutter-Fella, T. Chen, H. Ota, E. W. Schaler, S. De Wolf, C. Ballif, A. Cuevas, A. Javey, Efficient silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts, *Nat. Energy*, Vol. 1, pp. 15031, 2016.
18. J. Bullock, Y. Wan, Z. Xu, S. Essig, M. Hettick, H. Wang, W. Ji, M. Boccard, A. Cuevas, C. Ballif, A. Javey, "Stable Dopant-Free Asymmetric Heterocontact Silicon Solar Cells with Efficiencies above 20%", *ACS Energy Lett.* Vol. 3, pp. 508, 2018.
19. C. Battaglia, X. Yin, M. Zheng, I. D. Sharp, T. Chen, S. McDonnell, A. Azcatl, C. Carraro, B. Ma, R. Maboudian, R. M. Wallace, A. Javey, *Nano Lett.*, Vol. 14, pp. 967, 2014.
20. C. Battaglia, S. M. de Nicolas, S. De Wolf, X. Yin, M. Zheng, C. Ballif, A. Javey, "Silicon heterojunction solar cell with passivated hole selective MoOx contact", *Appl. Phys. Lett.*, 104, 113902, 2014.
21. J. Geissbuhler, J. Werner, S. M. Nicolas, L. Barraud, A. Hessler-Wyser, M. Despeisse, S. Nicolay, A. Tomasi, B. Niesen, S. D. Wolf, C. Ballif, "22.5% efficient silicon heterojunction solar cell with molybdenum oxide hole collector", *Appl. Phys. Lett.*, 107, 081601, 2015.