고효율 실리콘 태양전지

DOI: 10.3938/PhiT.28.016

주민규·김세연·김상호·김영국·조은철·이준신

High Efficiency Silicon Solar Cells

Minkyu JU, Seyoun KIM, Sangho KIM, Youngkuk KIM, Eun-Chel CHO and Junsin YI

Crystalline silicon solar cells with less than 1% conversion efficiency were developed in 1941 and now have been developed to 26.7% efficiency, which is close to the theoretical efficiency limit of 29%. Silicon solar cells account for more than 95% of the solar market. The price of a photovoltaic module decreased by 20% as the number of installations doubled. At the end of 2018, photovoltaic modules were trading at 0.24 \$/W, with a total of 504 GW being used by photovoltaic modules, installed worldwide. In the photovoltaic market, high efficiency passivated and emitter rear cell (PERC) solar cells with a conversion efficiency of over 21% have grown into the mainstream market, and higher efficiency solar cell, such as silicon

hetero junction (SHJ), tunnel-oxide passivated contact (Topcon) and heterojunction back contact (HBC) solar cells, are being developed. In this article, we review the history of silicon solar cells and the technical and industrial trends of high efficiency silicon solar cells, including bifacial solar cells.

실리콘 태양전지의 발전

1941년 미국의 벨 연구소에서 1% 미만의 변환효율로 처음 실리콘을 이용한 태양전지를 개발한 이래 약 29%의 이론적 한계 효율에 근접한 26.7%의 효율이 일본의 카네카 연구소에 의해 2017년 3월에 달성되었다.^[1-3]

최초의 태양광 산업은 1973년 제1차 석유파동(oil shock)을 겪은 전 세계 대부분의 정부 프로그램에 의해 출범하게 되었다.^[4] 이때에 개발된 실리콘 태양전지는 약 15%의 효율로 광 흡수 개선을 위한 반사방지막과 더불어 전면과 후면에 n 형의 에미터와 후면에 알루미늄 금속을 열확산 접촉하여 알루미늄 후면전계(Aluminum Back Surface Field, Al-BSF)를 형성한 BSF 태양전지 구조로 일반화되었다.^[5]

상업적인 실리콘 태양전지로 제작된 모듈의 가격은 1975년 대에 와트(w) 당 \$100 정도에 형성되어 가격이 매우 비싸 경제성이 부족하였으며, 대부분의 사람들은 획기적인 에너지원으로 생각하지 않았다.^[6] 그러나 40여 년이 지난 지금의 결정질 실리콘 태양전지 모듈은 2018년 기준 와트(w) 당 \$0.24 수준으로 보고되었으며, 지상용 태양광 발전의 누적 설치용량은 504 GW를 넘어서고 있다.^[7] 이러한 태양광 산업 즉, 결정질

저자약력

주민규 박사는 (주)케이피에서 2006년부터 태양전지 연구개발을 시작하여 성균관대학교 태양광특성화대학원에서 석박사 학위를 취득하였고, 동대학 IT융합연구원의 박사후연구원으로 재직하면서 고효율 실리콘 태양전지를 응용한 차세대 수소생산기술을 연구 중이다.

김세연 연구원은 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정 학생으로 양면수광형 태양전지 연구를 진행 중이다.

김상호 연구원은 성균관대학교 에너지과학과 석박사 통합과정 학생으로서 SHJ 양면수광형 탠덤 태양전지 연구를 진행 중이다.

김영국 박사는 경희대학교에서 물리학 석사와 성균관대학교에서 태양광시스템공학 박사학위를 취득하였고, (주)케이피에서 결정질 실리콘 태양전지 연구개발을 시작하여 한화큐셀에서 수석연구원으로 PERC 및 HIT 고효율 실리콘 태양전지 연구를 총괄 진행하였으며, 현재 성균관대학교에서 실리콘 이중접합 태양전지 및 이를 활용한 탠덤 태양전지 연구를 진행 중에 있다.

조은철 교수는 호주 UNSW(University of New South Wales)에서 전기공학(태양광) 박사학위를 취득하였고, 삼성중합기술원, 삼성SDI에서 태양전지 연구개발을 시작하여, 현대중공업에서 태양광 연구개발과 셀 생산을 담당하였으며, 현재 성균관대 초빙교수로 재직 중이다.

이준신 교수는 뉴욕주립대 전자전기공학에서 석박사 학위를 취득하고, 포톤반도체에너지를 설립하여 우리나라 최초로 태양전지 양산에 성공하였으며, 국가기술 자문과 다수의 태양전지 및 디스플레이 관련 서적을 집필하였으며, 현재 성균관대학교 정보통신대학 교수로 재직 중이다.(junsin@skku.edu)

REFERENCES

- [1] Martin A. Green, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **17**, 183 (2009).
- [2] Kunta Yoshikawa, Nature Energy **2**, 17032 (2017).
- [3] Martin A. Green, Prog. Photovolt. Res. Appl. **27**, 3 (2019).
- [4] Siamak Mehrnami, Solar Cell Devices Final Report, Optoelectronics.
- [5] Martin A. Green, Crystalline Silicon Solar Cell, pp. 1-49 (2001).
- [6] Richard M. Swanson, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **14**, 443 (2006).
- [7] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2018 Results, Tenth Edition, March (2019).

Fig. 1. Conventional BSF cell structure.

Fig. 2. Worldwide market shares for different cell technologies.^[7]

실리콘 태양전지의 놀라운 성장 배경에는 양산기술(장비, 공정, 재료)의 발전과 더불어 실리콘 태양전지의 누적 생산량을 두 배로 늘릴 때마다 약 20% 내외의 비용 절감 효과라는 특별한 제조상 규칙이 나타난 것으로 보고되었다.^[6] 특히 2010년 이후 기존 업체에 의한 급속한 생산능력 확장과 많은 신규 사업자의 시장 진입에 의한 공급 과잉으로 대규모 생산시설을 통해 가격경쟁력을 갖춘 태양광 기업들에 비해 영세한 수많은 소규모 태양광 기업들은 생산 중단 및 파산하는 사태를 가져왔다.^[8] 또한, 2018년 5월에 보고된 중국 정부의 지원 제도 변경으로 인한 수요 감소 예상은 태양광 시장의 급격한 가격 하락과 더불어 수요의 급락은 변환효율 20% 미만의 일반화된 공정으로 제작되어진 BSF 실리콘 태양전지에서 변환효율 21% 이상을 충족하는 진보된 공정(advanced process)으로 제작된 고효율 구조의 태양전지로 수요 이동을 촉진시켰다.^[9]

이후 저가화된 시장경쟁 체제에서 20% 수준의 효율 개선 한계에 도달한 BSF 태양전지는 점차 소멸되고 있으며, Laser 양산 기술이 적용된 국부적 알루미늄 후면전계 구조(Local Al-BSF)의 고효율 PERC(Passivated Emitter Rear Contact) 태양전지가 21% 이상의 고효율로 대량생산성을 겸비하여 높은 가격경쟁력으로 시장 점유율을 빠르게 확대해가고 있다.^[7,9]

Fig. 3. Power loss analysis of BSF cell.

Fig. 4. Evolution of crystalline silicon solar cell efficiency.^[1-3]

고효율 실리콘 태양전지의 기술현황

1974년에 개발되어 양산화에 성공한 일반화된 BSF 구조의 실리콘 태양전지는 그림 3에서와 같이 약 29%의 이론적 실리콘 태양전지의 한계 효율을 기준으로 입사되는 태양광에서부터 그림자 및 반사에 의한 약 3.6% 정도의 광학적 손실과, 태양광 흡수에 의해 생성된 캐리어(전자정공쌍)의 분리 및 수집과정에서 발생하는 약 8.8%의 재결합 손실, 그리고 분리된 전자정공이 전극을 통해 빠져나오는 과정에서 약 1.6%의 전기적 저항 손실들을 가지고 있다.

이러한 효율 손실들을 개선하기 위한 노력들이 세계의 여러 연구기관들에서 활발히 연구되기 시작하여 다양한 고효율 태양전지의 구조들이 개발되었다.

1974년 광학적 손실을 개선하기 위한 후면전극형 구조인 BPC(Back Point Contact) 태양전지 구조가 가장 먼저 선을

REFERENCES

- [8] Jeonghwa Kang, The PV industry trend of 4th quarter 2018, KERI(Korea Eximbank Overseas Economic Research Institute), 2019-02 (2019).
- [9] PV infoLink, PV Market Outlook and Forecast in 2019, November (2018).

Fig. 5. Evolution of crystalline silicon solar cell technology.

Fig. 6. HBC(Hetero-junction Back Contact) cell.

Fig. 7. SHJ(Silicon Hetero Junction) cell.

보였으며, 1984년에는 캐리어의 재결합 손실을 개선하는 패시베이션(passivation)형 태양전지 구조인 MINP(Metal Insulator NP junction) 태양전지 구조, 1985년에는 전기적 손실을 개선하는 BCSC(Buried Contact Solar Cell) 구조가 개발되었다. 같은 해에 MINP 구조에서 개량된 PESC(Passivated Emitter

Fig. 8. TOPCon(Thin Oxide Poly Contact) cell.

Fig. 9. i-PERC(Industry PERC) cell.

Solar Cell) 구조가 개발되면서 실리콘 태양전지 최초로 20% 이상의 고효율이 달성되었다.^[1,4]

이러한 고효율 태양전지 구조들은 해가 거듭될수록 상호 보완적인 기술들로 발전하면서 최적화되기 시작하였으며, 공정 장비 기술의 발전과 더불어 이론적 한계 효율에 근접한 HBC(Hetero-junction Back Contact) 태양전지 구조가 2014년에 개발되었다.^[10]

각 개발된 주요 고효율 실리콘 태양전지의 세부 구조들을 그림 6-9에서 보여준다.^[2,10-13] 특히, 그림 9의 p형 실리콘기판을 사용하여 개발된 양산형의 i-PERC(Industry PERC) 태양전지는 2019년 1월 LONGi Solar에 의해 양산화 공정에서 24% 이상의 초고효율이 달성되는 등 앞으로의 태양광 산업을 견인하는 초고효율 실리콘 태양전지의 핵심기술로 성장될 것으로 전망된다.^[7,13]

양면수광형 고효율 태양전지

양면수광형 태양전지는 전면뿐만 아니라 후면에서도 빛을 흡수하여 동시에 발전할 수 있는 태양전지 구조를 말한다. 기존의 일반적인 태양전지(단면수광형)는 후면에 금속 전극을 전체 면에 형성하여 지면 반사에 의한 빛을 흡수할 수 없는 구조인 반면에, 양면수광형 태양전지는 후면의 금속 전극도 전면의 금속 전극과 같은 그리드(grid) 형태의 구조로 형성하여 그림 10에서와 같이 후면에서도 태양광을 흡수할 수 있도록 설계한 구조이다.

양면수광형 태양전지의 성능 지표로는 바이패설리티(bifaciality)가 사용된다. 바이패설리티는 태양전지의 전면 효율(또는 출력) 대비 후면 효율(또는 출력)로 정의되며, 다음 식과 같이 표현된다.^[14]

$$\text{Bifaciality} = \frac{\text{후면 태양전지 효율}}{\text{전면 태양전지 효율}} \times 100$$

기본적으로 모든 태양전지는 양면수광형으로 제작이 가능하나, 추가적인 공정으로 인해 상승되는 비용대비 후면의 태양광 흡수를 통해 얻을 수 있는 이득이 고효율 태양전지일수록 크기 때문에 고효율 태양전지를 양면수광형으로 제작하려는 노력을 많이 하고 있다. 대표적인 고효율 양면수광형 태양전지로는 PERC 형태의 양면수광형 태양전지인 PERC+와 PERT(Passivated Emitter Rear Totally diffused) 및 실리콘 이종접합 태양전지인 SHJ(Silicon Hetero Junction) 형태의 양면수광형 태양전지 등이 있다.

양면수광형 태양전지는 태양전지 모듈이 설치되어 있는 위치의 지면 반사에 의한 태양전지 후면에서의 태양광 흡수를 이용하기 때문에, 태양전지의 출력 향상은 설치된 지면의 반사도(=알베도, Albedo)에 따라 좌우된다. 알베도는 표면이나 물체에 입사된 일사에 대한 반사된 일사의 비율을 말한다.^[15]

알베도의 값이 0.25인 잔디밭에 바이패설리티가 100%인 양면수광형 태양전지의 출력을 단면수광형 태양전지와 비교하여 살펴보면, 산술적으로 양면수광형 태양전지가 25%의 출력 이득이 있다고 볼 수 있다. 그림 11은 단면수광형과 양면수광형 태양전지의 모듈을 각각 동쪽 방향과 남쪽 방향으로 설치한 후 일 년 동안의 총 생산된 출력을 일일 평균하여 분석한 출력 그래프이다. 어느 방향으로 설치를 하든지 상관없이 양면수광형 태양전지의 발전량이 크게 높은 것을 볼 수 있다.^[17]

Fig. 10. Mono-facial PERC (left) and bifacial PERC+ (right) solar cells.

이와 같이 양면수광형 모듈은 어떤 방향으로 설치하느냐에 관계 없이 단면수광형 태양전지 모듈의 출력보다 약 30% 정도까지 출력이 높게 나오는 것으로 알려지고 있다.^[18] 이러한 출력의 향상은 발전을 위한 비용을 줄이는 효과로 분석될 수 있으며, 이는 특정 에너지의 발전에 대한 경제성 평가를 위해 균등화발전비용(Levelized Cost Of Energy, LCOE)이라는 개념으로 논의되고 있다. 균등화발전비용은 발전소를 건설하고 운용, 유지에 들어가는 총비용 대비 발전소가 생산할 수 있는 총 에너지의 비로, 낮은 가격을 보일수록 경제성이 좋다고 판단할 수 있다. 균등화발전비용 측면에서 양면수광형 태양전지는 제조비용이 다소 높더라도 높은 출력의 효율성으로 인해 낮은 균등화발전비용을 쉽게 달성할 수 있어 경제성이 크다는 것을 쉽게 알 수 있다.^[19] 이러한 장점들로 인해 고효율 양면수광형 태양전지의 수요와 생산이 꾸준히 증가되고 있으며, ITRPV 보고서에서는 양면수광형 태양전지의 시장 점유율이 2026년에는 50%까지도 도달할 것으로 예측하고 있다.^[7]

REFERENCES

- [10] Junichi Nakamura, IEEE J. Photovolt. **4**, 1491 (2014).
- [11] Daisuke Adachi, Appl. Phys. Lett. **107**, 233506 (2015).
- [12] Armin Richter, Solar Energy Materials and Solar Cells **173**, 96 (2017).
- [13] Anu Bhambhani, CPVT Confirms Longi Produced First Bifacial Monocrystalline Silicon PERC Solar cell Exceeding 24% on Commercial Wafer Size, TaiyangNews, 18th January (2019).
- [14] Thorsten Dullweber, Prog. Photovolt: Res. Appl. **24**, 1487 (2016).
- [15] Shravan K. Chunduri and Michael Schmela, Bifacial Solar Module Technology 2018 Edition, TaiyangNews (2018).
- [16] Charles W. Downer, Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual; Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1, ERDC/CHL SR-06-1, September (2006).
- [17] EPRI, BIFACIAL SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES, September (2016).
- [18] Panasonic pamphlet, bifacial photovoltaic module VBNH-225DJ06, April (2019).
- [19] J. Libal, D. Berrian, R. Kopecek, Overview: energy yield simulations and calculation of LCOE for bifacial PV systems, ISC, October 26 (2017).

Table 1. Albedo of various environments.^[16]

주변 지면	Albedo
도시환경	0.14-0.22
유리(glass)	0.15-0.25
깨끗한 눈(snow)	0.82
젖은(wet) 눈(snow)	0.55-0.75
건조한 아스팔트	0.09-0.15
젖은 아스팔트	0.18
화이트 콘크리트	0.55
콘크리트(concrete)	0.25-0.35
맨땅(bare soil)	0.17
잔디밭(green grass)	0.25
사막(desert sand)	0.40
적 벽돌(red tiles)	0.33

Fig. 11. Mono-facial and bifacial vertical installation.^[17]

태양광 산업동향

2017년 산업통상자원부(MOTIE)가 재생 가능 에너지는 2030년까지 재생에너지 발전 비율을 20%까지 확대하는 RE3020을 목표로 하였다. 2017년 말에 발표된 ‘제8차 전력수급 기본계획’에서 2017년부터 2031년까지 향후 15년간의 전력수급전망을 발표했다. 한국 정부는 중기 예측을 위한 전력수급 계획을 2년마다 발표하고 있다. RE3020 계획은 현재 설치된 11.3 GW에서 시작하여 정책기간 내 58.5 GW의 총 재생 가능 전기 용량 확대를 계획하고 있다. 이는 2030년 전국 총 전기 용량의 33.7%에 해당하며 현재 9.7%에서의 큰 도약이다. 태양광 발전은 신재생 에너지의 50% 이상인 30.8 GW 수준에 도달할 것으로 예상된다.

2012년에 시작된 RPS(Renewable Portfolio Standards) 제도는 태양전지 설치, 특히 소규모 시스템의 주요 원동력이다. 500 MW 발전 용량을 초과하는 전력회사는 2019년부터 2024

Bifacial cell in world market

Fig. 12. Worldwide market shares for bifacial cell technology.^[7]

년의 기간 동안 각각의 신재생에너지원으로부터 6.0%에서 10.0%의 전력을 의무적으로 공급해야 한다고 규정하였다.

산악 지형이 많은 우리나라는 분산형 전력생산을 에너지 계획의 핵심 정책목표로 하였다. 분산형 발전의 전체 발전량은 2017년의 11.2%에서 2030년 18.4%로 확대하는 것이 목표이다.

현재 소규모 태양전지 설치의 총 누적 설치 용량의 약 90%를 차지하며 분산형 태양광발전 시스템은 전체 설치의 10%를 약간 상회한다. 스마트미터, 에너지저장 시스템 및 전기자동차용 인프라를 포함한 스마트 그리드 기술 개발을 통해 분산형 태양광에 초점을 맞추어 예정이다. 또한 더 많은 사람들이 재생 가능 에너지의 확대에 참여하기 위해, 대규모 프로젝트를 지원하고 장려할 계획이다. 주택 보조금 프로그램, 건축 보조금 프로그램 및 공공건물 의무 설치 프로그램에 따라 건물에 있는 태양광발전시스템에 대한 인센티브가 있다. 마지막으로, 공공건물 의무 설치 프로그램은 새로 건축되거나 확장된 대형 공공건물에 1,000 m² 이상의 면적을 갖도록 계획 중이다. 2025년부터 5,000 m² 미만의 공공 및 사유 건물, 2030년부터는 모든 건물을 대상으로 공공건물 건설을 위한 제로 에너지 건축 의무 프로그램을 진행할 것이다.

국내의 송전 및 배전에 대한 독점권 문제로 민간 기업이 독립 태양광 에너지 생산 업체로부터 직접 재생 에너지를 구매할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 그리고 재생가능에너지의 전력망 연결 지연 문제를 해결해야 한다.

국내 태양전지 시장은 RE3020 정책에 따라 크게 확대될 것이며, 수용력 강화, 설치비용 절감 및 시장 확대를 통해 지속 가능한 순환 구조로 들어설 것이다. 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS) 시장은 태양광 산업의 시장 확대에 따라 증가될 것이며, 전력시장은 가변재생에너지(Variable Renewable Energies, VRE), 특히 태양광 및 풍력의 확장으로 인해 변화될 것으로 예상된다.