

실리콘 태양전지 고효율화 소재, 기술 동향 및 향후 전망



안시현
성균관대학교
정보통신대학
전자전기공학부
박사과정



박철민
성균관대학교
에너지과학과
박사과정



이영석
성균관대학교
에너지과학과
박사과정



이윤정
성균관대학교
정보통신대학
전자전기공학부
연구교수



이준신
성균관대학교
정보통신대학
전자전기공학부
교수

요 약

실리콘(결정질, 비정질)을 기반으로 하는 태양전지는 현재 태양전지 시장의 약 95% 이상을 차지하고 있다. 양자점 태양전지나 나노 태양전지와 같은 차세대 태양전지 기술들이 개발되고 있으나 향후에도 태양전지 시장에서 실리콘 기반의 태양전지가 차지하는 비율은 과반을 상회할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 실리콘 기판을 기반으로 하는 태양전지의 현황과 고효율화 기술 동향 및 향후 전망에 대해 논하려고 한다.

서 론

세계 태양광산업은 2008년까지 연평균 50% 이상의 높은 성장률을 기록했으나 유럽지역의 금융위기 이후 수요 위축으로 2009년에는 15.9%로 성장률이 크게 둔화되었다. 2010년에 유럽 시장의 폭발적인 성장(독일 10GW 신설, 이탈리아 1.27GW 신설¹⁾), 각종 보조금 및 세제 혜택, 국제유가 급등에 힘입어 전반적인 태양광 시장이 성장세로 돌아섰으나 2012년 들어 세계 태양전지 및 모듈 생산량의 50% 이상을 점유하고 있던 중국 기업들의 저가화 공세에 의해 많은 기업들이 도산하거나 위기에 처했고, 재정위기를 겪으며 유럽 각국이 태양광 관련 지원 규모의 감소 및 국제 유가 하락으로 인해 가격 경쟁력을 상실하면서 시장은 침체의 길로 접어들었다. 이후 태양광 시장은 수요 감소와 공급 과잉으로 인해 정체기로 진입하여 어려움을 겪었지만, 이 가운데서도 세계 태양광 시장은 매년 전망보다 더 큰 규모로 형성되고 있다.

그 이유로는 장기적으로 과거의 유럽 중심의 태양광 수요가 미국, 중국과 일본 등으로 확대되면서 세계 태양광 시장은 지속적인 성장을 할 것으로 보고 있기 때문이며, 현재의 태양광 시장이 불황이라고 해서 세계적인 태양광 에너지에 대한 수요가 감소한 것은 아니기 때문이다. 태양광 에너지에 대한 수요는 늘어나고 있으나 공급시장의 과열로 인한 일시적인 정체기를 겪은 것으로 판단된다.

최근 IHS의 발표에 따르면, 최근 수년간 침체를 겪었던 태양광 시장이 수요개선 및 기동률 상승 등의 요인이 겹치면서 2014년 44GW 대비 30% 이상 성장한 57GW에 달할 것으로 전망했다. 또한, 전 세계 태양광 모듈 매출액 규모는 지난해 310억 달러에서 올해 380억 달러로 20% 증가하고 수익은 23억 달러에서 50억 달러로 무려 배 이상 늘어날 것으로 예측되며, 이는 2011년 이후 최대 수익 예상 규모이다.

태양광 시장이 일시적인 정체기를 지나 긍정적인 상황으로 변함에 따라 관련 연구 및 기업들은 주도권을 선점하기 위해 모든 역량을 집중하고 있는 중이다. 그 중에서도, 실리콘을 기반(결정질, 비정질)으로 하는 태양전지는 현재 태양전지 시장의 약 90% 이상을 차지하고 있다. 차세대 태양전지 기술들이 개발되고 있으나 향후에도 태양전지 시장에서 실리콘 기반의 태양전지가 차지하는 비율은 과반을 상회할 것으로 예상된다. 따라서 이 글에서는 실리콘을 기반으로 하는 태양전지의 현황과 전망에 대해 기술하여 향후 태양광 시장의 기술 흐름 및 Grid Parity를 달성하고 최고의 신재생 에너지 산업이 되기 위한 태양광 산업의

움직임을 논하려 한다.

본 론

1950년대 처음으로 p-n 접합을 기반으로 한 태양전지가 개발되었을 때의 변환효율은 약 4.5%였으나, 여러 관련 연구기관 및 기업들의 개발로 인해 태양전지의 변환효율은 급격하게 상승하여 이론적 최고효율이라고 하는 29%에 근접하게 되었다.^[3] 현재 최고효율은 Panasonic(구. Sanyo)에서 발표한 HIT-IBC(Heterojunction with Intrinsic Thin layer solar cell-Interdigitated Back Contact) 태양전지로서 143.7cm²의 면적에서 25.6%의 변환효율을 가진다.^[4] 본 장에서는 현재까지 태양전지 변환효율 향상에 주요한 영향을 미쳤던 인자들(소재, 구조 및 공정기술)에 대해서 논하려고 한다.

실리콘 웨이퍼(Silicon Wafer)

최근 수년간 양적인 성장을 지속해온 태양전지 산업은 80% 이상의 시장점유율을 가진 결정질 실리콘 태양전지 산업의 성장이었다. 그러나 2009년 글로벌 금융위기 이후에 공급이 수요를 초과하게 되었고, 이는 곧 태양전지 시장의 가격붕괴 현상을 초래하게 되었다. 이로 인하여 태양전지용 결정질 실리콘 웨이퍼 소재인 폴리 실리콘의 가격

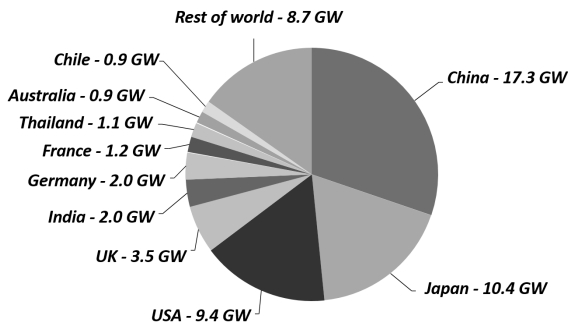


그림 1. 2015년 세계 태양광 설치용량 예측^[2]

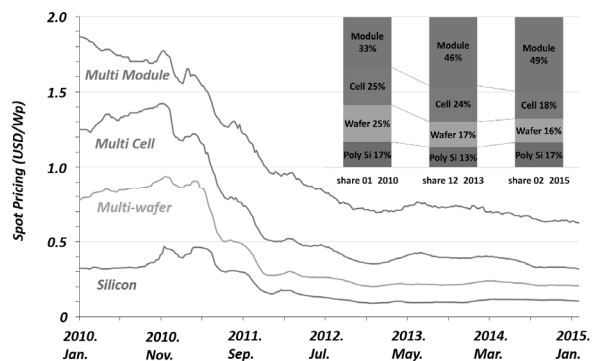


그림 2. 실리콘(Mono, Multi) 웨이퍼와 셀, 모듈의 연도별 가격동향 및 분포^[5]

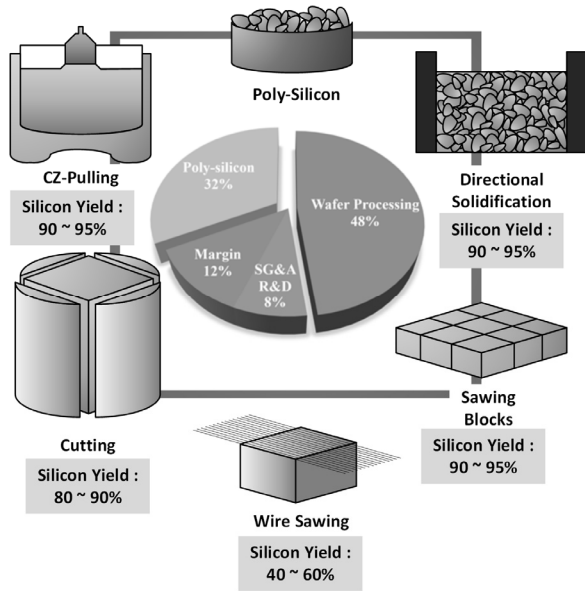


그림 3. 결정질 실리콘 웨이퍼의 제조비용 분석^[6]

하락이 시작하게 되었고, 현재 금융위기 이전의 가격 보다 약 4배 이상 하락하게 되었다.

고효율 태양전지를 위한 결정질 실리콘 웨이퍼의 제조 비용을 분석해 보면, 웨이퍼 원자재인 폴리 실리콘의 구매 비용보다 웨이퍼 제작 공정에서 발생하는 부대비용이 더 많음을 알 수 있다. 더욱이 폴리 실리콘의 가격이 낮아지면 상대적인 웨이퍼 제조비용의 비중이 더욱 증가하게 된다.

태양전지용 실리콘 웨이퍼의 가격 경쟁력을 고취하기 위한 노력들은 그림 3에서와 같이 주로 잉곳 크기의 증가 및 실리콘 웨이퍼의 두께 감소를 통해서 태양광 시스템의 가격구성에서 실리콘 재료의 가격을 낮추는 기술에 초점이 맞추어져 있다.

이러한 사례를 통하여 시장의 가격논리에 사장되지 않는 웨이퍼 제조기술의 방향은 최소 비용으로 고효율 태양 전지 제작이 가능한 고품질의 웨이퍼를 제작할 수 있는 기술이어야 한다.

확산형 태양전지(Diffused Solar Cell)

결정질 실리콘 태양전지는 현재까지도 태양전지 시장에서 가장 많은 부분을 담당하고 있으며, 시중에 시판되는

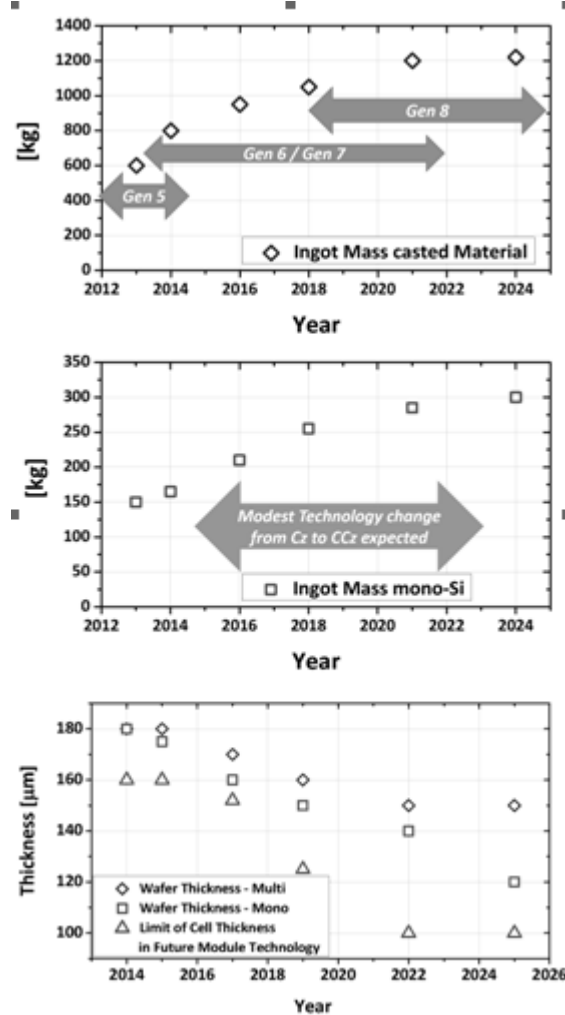


그림 4. 실리콘 잉곳 및 웨이퍼 두께의 경향 및 기술적 한계 두께 예측^[5,7]

태양전지 중에서 높은 효율 및 낮은 생산단가로 큰 이점을 지니고 있다. 결정질 실리콘 태양전지는 크게 단결정(Single crystalline) 형태와 다결정(Multi-crystalline) 형태의 재료로 나뉘며, 기본적으로 p-n 동종접합(Homojunction)으로서 태양전지에 사용된다. 다음 그림에 연도별 최상위 실리콘 태양전지의 에너지 변환효율 변천사를 도시하였다.

1950년대에 벨연구소에서 최초로 개발된 실리콘 태양 전지^[8]는 90년도에 이르러서 호주의 UNSW(University of New South Wales) 대학에서 PERL(Passivated Emitter with Rear Locally Diffused) 구조로 24%의 변환효율을 달성하였다.^[9] PERL구조의 태양전지는 여전히 단결정 실

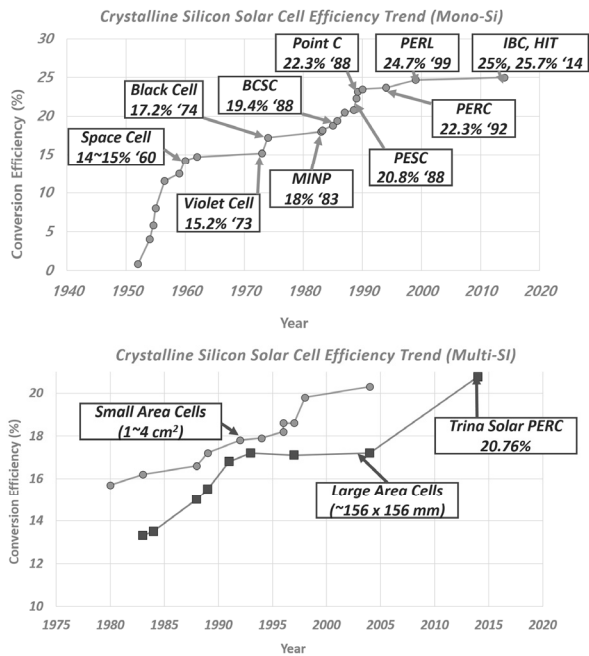


그림 5. 연도별 태양전지 효율 변화 및 구조

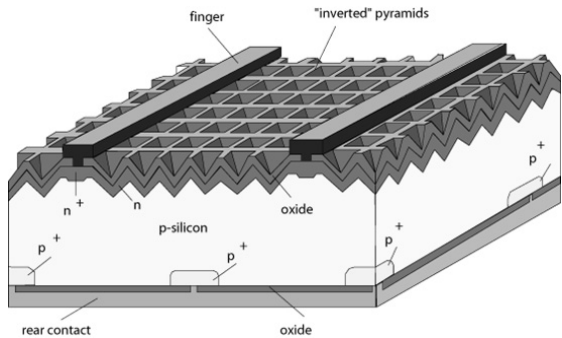


그림 6. 24.7%의 변환효율을 기록한 PERC구조

리콘 태양전지 분야에서 최고의 효율을 기록하고 있으며, 초고효율 태양전지를 달성하기 위한 결정질 태양전지의 여러 가지 구조 중에서 가장 많이 거론되고 있는 구조이다.

그러나, 높은 효율을 갖는 PERC구조의 태양전지를 양산화 하기에는 복잡하고 많은 공정순서와 그에 따른 생산비용의 증가가 저가화 및 양산화 측면에서 걸림돌이 되고 있는 상황이다.

연구실에서 개발된 초고효율 태양전지와 양산화를 목적으로 하는 태양전지 사이에는 효율 및 생산비용 부분에서 큰 차이가 있다. 양산을 목적으로 하는 일반적인 구조의 태양전지의 경우 간단한 구조와 빠른 생산속도 및 저가화

된 소재를 사용하여 와트 당 생산단가를 최소화하고 있다. 하지만 이런 일반적인 구조의 태양전지는 19~21%의 양산 효율에 머무르고 있는 상황이라 25%의 변환효율을 갖는 초고효율 태양전지와는 여전히 큰 차이를 보이고 있다.

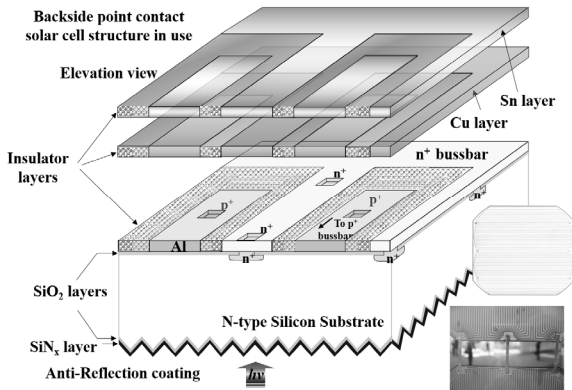
90년대부터의 결정질 실리콘 태양전지의 기술현황 및 전망에 대한 요약이 표 1에 요약되어 있다.^[10] 위에서 언급한 것처럼, p-type을 위주로 형성된 결정질 실리콘 태양전지시장은 n-type을 기반으로 재편될 예정이며, 기존의 일반적인 태양전지 구조에서 벗어나 선택적 에미터 형성 기술 및 후면 국부적 접합구조가 일반적인 양산기술에 적용되어 양산화 및 고효율화가 진행될 것이다. 또한, 기존의 스크린 인쇄방식에서 벗어나 Plating이나 Layer Transfer와 같은 새로운 전극 형성 방법이 사용되어 Shadowing Loss 및 전극부분에서의 직렬저항 성분을 최소화 하여 광학적·전기적 손실을 최소화 하는 기술이 적용 될 것이다.

일반적인 구조를 갖는 양산형 태양전지의 효율을 극복하고 높은 변환효율을 통한 태양광 시장 선점 및 와트 당 생산단가의 개선을 위해서 몇몇의 태양광기업들은 기존의 구조와는 다른 새로운 구조의 태양전지를 양산화 하기 시작했는데 IBC(Interdigitated Back Contact) 와 HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin Layer), 태양전지가 대표적인 새로운 구조의 양산형 고효율 구조로 손꼽힌다.^[11,12]

IBC(Interdigitated Back Contact) 태양전지

IBC 태양전지는 1980년대 Stanford University에서 최초로 개발되었으며^[13] 전면에 위치하고 있던 Emitter층을 후면에 배치해서 전면에 있던 Finger와 Bus-bar를 모두 후면에 배치한 것이 특징이다.

IBC 태양전지는 기존 태양전지의 전면에 있던 Finger와 Bus-bar를 제거함으로 인해 빛을 흡수할 수 있는 영역이 넓어지게 되므로, 광흡수의 증가가 일어나게 되어 단락전류의 증가를 이룰 수 있다. 또한 그림 8에서와 같이 초기 20% 초반의 변환효율을 보여주던 IBC 태양전지는 웨이퍼 두께 및 품질의 최적화, Light Trapping, Passivation을 통한 누설전류 감소 및 Point Contact면적의 최소화 등을



IBC 1st Gen Production $\eta \approx 20.5\%$	
IBC 2nd Gen Production $\eta \approx 22.2\%$	
IBC 3rd Gen Production $\eta > 24\%$	

그림 7. IBC 태양전지 효율향상의 핵심 기술^[14]

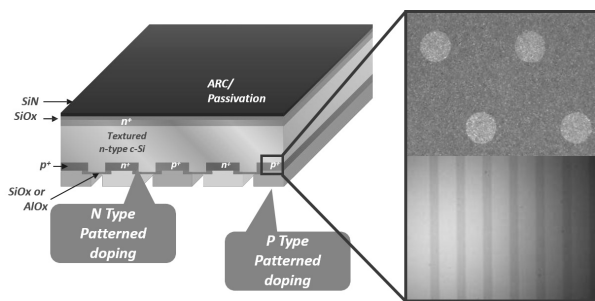


그림 8. Ion Implantation Patterning을 이용한 IBC 태양전지^[15]

통해 현재의 25% 변환효율까지 달성할 수 있었다.

기존의 IBC 태양전지는 후면에 Emitter와 BSF(Back Surface Field)영역을 모두 형성해야 하기 때문에 Patterning을 위한 추가적인 공정들이 요구되었다(Photolithography, Etching Barrier, etc). 하지만, Ion Implantation기술이 태양전지에 본격적으로 적용됨에 따라 추가적인 Patterning

공정 없이 Shadow Mask를 이용한 Ion Implantation기술로 IBC 태양전지의 생산 비용 및 시간을 단축할 수 있어 IBC 태양전지의 양산에 한 발 가까이 다가설 수 있게 되었다.

이종접합 태양전지(HIT Heterojunction with Intrinsic Thin Layer Solar Cell)

결정질 실리콘 기판을 이용한 태양전지 중에서 가장 높은 변환효율을 보이고 있는 태양전지 구조 중의 하나인 이종접합 태양전지는 Panasonic에서 원천 특허를 가지고 있는 태양전지 구조로서 결정질 실리콘 기판의 전후면에 매우 얇은 비정질 진성 실리콘(i a-Si:H)을 passivation 층으로 증착함으로써, 태양전지 p-n 접합 내부에서의 결합을 최소화하고 밴드갭 에너지가 큰 비정질 실리콘 도핑 층을 형성하여 광흡수 손실 최소화와 높은 전계효과를 가질 수 있는 구조이다.

그림 9에서는 동종접합구조를 가지는 일반적인 확산형 태양전지와 이종접합구조를 가지는 HIT 태양전지의 구조를 나타내었다. 박막 실리콘 태양전지와 매우 유사한 구조를 가지는 HIT 태양전지의 경우, passivation을 위하여 진성 비정질 실리콘(i a-Si:H)층을 표면요철화된 결정질 실리콘 기판의 전·후면에 증착하고, p type의 고농도 비정질 실리콘(p a-Si:H) 전면에 증착하며 후면에는 n type의 고농도 비정질 실리콘(n a-Si:H)을 형성한다. 그리고 전·후면의 반사방지막 및 전극으로 사용될 투명한산화막 TCO(Transparent Conductive Oxide)와 metal grid를

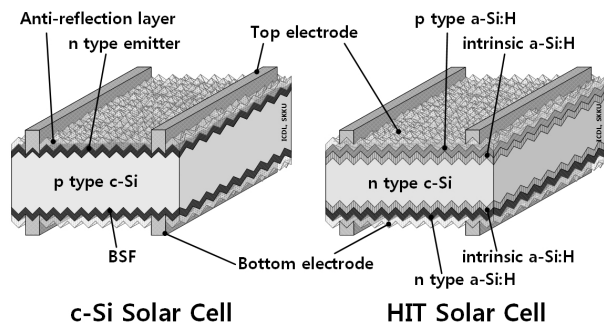


그림 9. 일반적인 결정질 태양전지와 이종접합 태양전지의 구조

표 1. 결정질 실리콘 태양전지의 기술발전 현황 및 전망

세부사항		년도	1990's (300 wfs/h)	2000's (1,000 wfs/h)	2010's (2,500 wfs/h)	2020's (5,000 wfs/h)	
Wafer	Type		P-type(4")	P-type(5")	P-type(6")	P-type(8")	N-type
	Thickness (μm) Ingot		500 Si 25\$/kg (100kg ingot)	350 Si 30\$/kg (100kg ingot)	200 Si 120\$/kg (600kg ingot)	120 Si < 20\$/kg (1200kg ingot)	120 (Yield?)
Emitter RS	Structure		Homogeneous Emitter	Homogeneous Emitter	Homogeneous Emitter + SE	SE, PERC, MWT, EWT	MWT, EWT, IBC, Tandem
	RS (ohm/sq)		20	30	50	Low R _s -70 High R _s -120	120
Front ARC			TiO ₂	SiN _x	SiN _x	SiN _x	Al ₂ O ₃ /SiN _x
Metallization	Method		Screen Print	Screen Print	Screen Print	Screen Print Plating Layer Transfer	Screen Print Plating Layer Transfer
	Material		Ag	Ag	Ag	Al, Ni+Cu+Sn	Al, Ni+Cu+Sn
	Width(μm)		150	100	80	60	60
	Thickness(μm)		10	15	20	30	30
BSF			Al-BSF	Al-BSF	Al-BSF	Local BSF	Local BSF
Rear Passivation			N/A	N/A	N/A	SiN _x , SiO ₂ , Al ₂ O ₃	SiN _x , SiO ₂

표 2. 확산형과 이종접합 태양전지의 공정 및 특징 비교

	확산형 태양전지	이종접합 태양전지
Substrate	c-Si, mc-Si p or n type	c-Si n type
pn junction	Diffusion Furnace	p a-Si:H PE-CVD
ARC	SiN _x PE-CVD	ITO Sputter or RPD
BSF	Al-BSF or Diffusion Screen-Print(Firing) or Furnace	n a-Si:H PE-CVD
Metal Grid	Ag or Ag/Al Screen-Print(Firing)	Ag Screen-Print(Annealing)
Max. Process Temp.	≈ 950°C	< 200°C
Key Tech.	Bulk Passivation, Doping	Surface Passivation

형성한다.

비정질 실리콘층을 사용할 경우 결정질 실리콘에 비해 0.6~0.7eV 정도 에너지 밴드갭이 큰 물질이고 매우 얇게 형성할 수 있으므로 단파장영역에서의 광흡수 손실을 최소화하여 광이용률을 증가시킬 수 있으며, 높은 개방전압과 BSF 효과를 가져갈 수 있다. 그리고 에너지 밴드갭이 서로 다른 이종접합의 경우, 격자불일치(lattice mismatch)가 발생할 수 있지만 비정질 실리콘층을 사용할 경우, 결

정격자가 규칙성이 없이 이루어져있으므로 격자불일치가 발생하지 않고 결정질 실리콘 기판 위에 전성 비정질 실리콘층을 증착하여 실리콘 기판 표면의 재결합을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

표 2에서는 확산형 태양전지와 이종접합 태양전지의 재료, 공정 및 장비와 특징을 비교하였다. 일반적인 확산형 태양전지의 경우 Emitter 형성을 위한 Doping공정과 Metal Grid 소성을 위한 Firing 등의 공정이 950°C 정도의 높은 온도가 요구되나 비정질 실리콘의 이용하여 Emitter 및 BSF형성하는 이종접합 태양전지의 경우 대부분의 공정이 200°C 이하이고 온도가 가장 높은 Firing 공정 또한 200°C정도이므로 thermal damage를 감소시킬 수 있다. 하지만 비정질 실리콘은 Metal Grid를 통해 carrier collection을 하기에 상대적으로 너무 낮은 carrier mobility를 가지고 있다. 따라서 박막 실리콘 태양전지와 흡사하게 반사방지막의 역할과 전극으로 사용할 수 있는 투명전도 산화막을 전후면에 반드시 형성하여야 한다. Metal Grid의 경우도 비정질 실리콘 내부의 수소결합 파괴를 막기 위해 낮은 온도에서 소성을 진행하여야 한다.

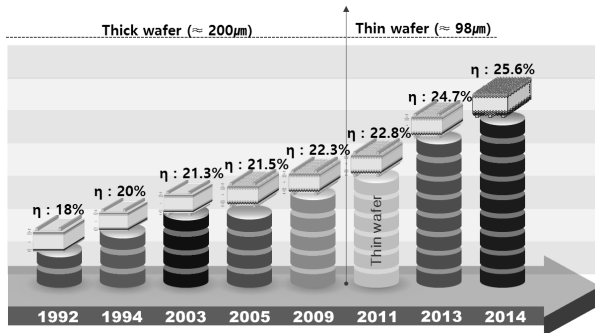


그림 10. 실리콘 이종접합 태양전지 발전 동향

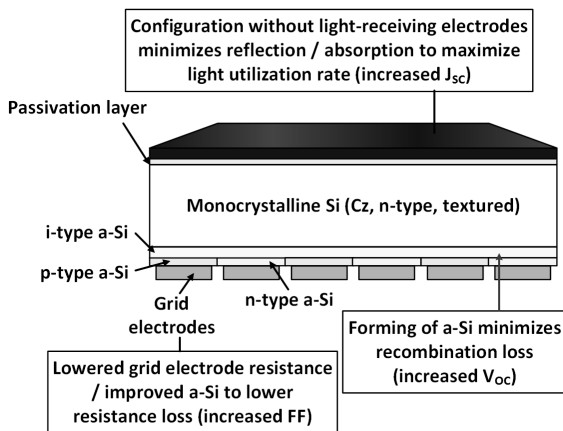


그림 11. IBC 구조를 가지는 이종접합 태양전지^[16]

그림 10에서는 1992년 처음으로 i a-Si:H를 이용해 Surface Passivation되는 이종접합 구조의 태양전지를 제작한 이래로 2014년까지 실리콘 이종접합 태양전지의 발전 동향을 나타내었다. Panasonic에서 고품질의 비정질 실리콘을 이용한 Passivation 특성 향상 및 Emitter 제작, Metal Grid의 공정 변화 등 핵심요소기술들을 지속적으로 개발하여 효율을 향상시켰으며 2011년에는 제조단가 저감을 이루기 위해서 기존 200µm의 wafer 두께를 98µm로 줄임에 따라 단락전류가 하락하기는 했지만, bulk 재결합이 확연히 감소하므로 큰 개방전압의 향상을 이루어 최종 변환효율 향상을 이룰 수 있었다. 또한 2013년 02월에 bifacial-HIT구조로 101.8cm²의 면적, 98µm 두께의 실리콘 기판을 이용하여 24.7%의 효율을 달성하였다.

그림 11은 2014년 4월에 Panasonic에서 143.7cm²의 면적, 98µm 두께의 실리콘 기판을 이용하여 emitter와

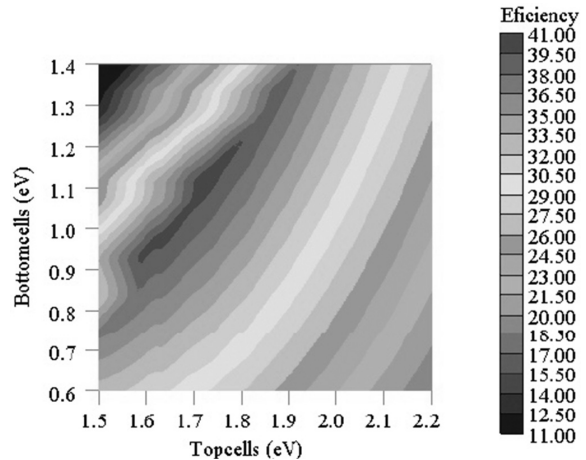


그림 12. 에너지 밴드갭 매칭에 따른 이론적 변환효율^[17]

BSF를 후면에 형성한 HIT-IBC 구조로서 광손실 최소화 및 광이용률을 극대화하여 단락전류를 향상시켜 25.6%의 최고효율을 달성하였다.^[4]

실리콘 기반 적층형 태양전지 (Silicon based Tandem Solar Cell)

기존의 실리콘 기판을 이용한 태양전지의 경우 전파장 영역에 걸친 광이용률이 적층형 박막 태양전지보다 효율적이지 못한 측면이 있다. 따라서 bottom cell을 결정질로 이용하고 top cell을 적층하는 다양한 연구가 시도되고 있다.

그림 12는 top cell과 bottom cell의 에너지 밴드갭 매칭에 따른 이론적 효율을 나타낸 것으로 이론상 효율 한계치인 41%까지 나올 수 있는 것으로 나타내고 있다.^[17]

실리콘 기판을 이용한 적층형 태양전지에 관한 연구는 전세계 다양한 연구팀에서 활발히 진행되고 있으며, 실리콘계 박막태양전지를 이용하는 경우와 Perovskite, CIGS 등 다양한 화합물계 top cell로 형성하는 경우로 크게 나눌 수 있다.

그림 13은 실리콘을 이용한 적층형 태양전지 중 실리콘계 박막 태양전지를 top cell로 이용한 형태이며 일본의 Tokyo Tech.와 AIST의 공동 연구팀과 국내 성균관대학교 ICDL에서 각각 연구를 진행하고 있다. 일본 연구팀은 2011년도에 10.7% 정도의 초기효율을 얻었으며 최근 성균관대

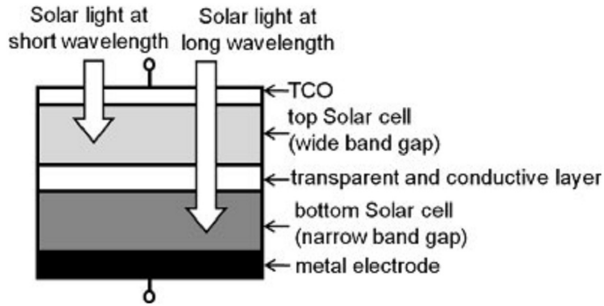


그림 13. 실리콘계 top cell을 이용한 실리콘 적층형 태양전지의 구조^[18]

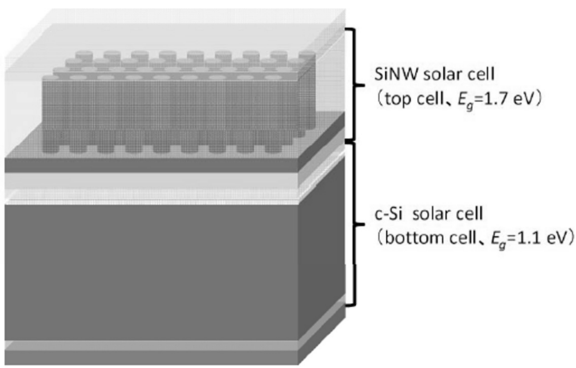


그림 14. SiNW top cell을 이용한 실리콘 적층형 태양전지의 구조^[17]

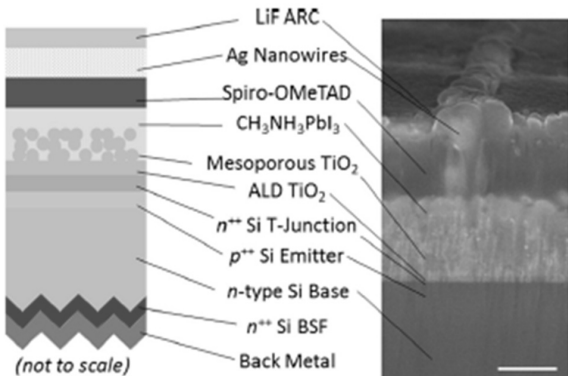


그림 15. Perovskite top cell을 이용한 실리콘 적층형 태양전지의 구조

ICDL 연구팀에서는 a-SiGe:H을 top cell로 이용하여 16% 효율을 달성하기도 하였다.

특히 일본 Tokyo Tech.의 Makoto Konagai 연구팀은 AIST, Panasonic, Kaneka 등 일본 내 산학연 뿐만 아니라 IMEC, ECN, NSTDA 등 국제 공동 연구팀과 함께 top cell의 형태를 SiNW(Silicon Nano-Wire)로 형성하는 실리콘 적층형 태양전지를 제작하여 30% 이상의 변환효율을 목표로 현재 연구를 진행하고 있다.

그림 14는 제안한 SiNW/c-Si 적층형 태양전지로서 top cell에 사용되는 SiNW는 Nano-Wire를 이용하여 에너지 밴드갭을 1.1~1.7eV로 조절하고 Al₂O₃를 사용하여 SiNW의 Surface Passivation하여 실리콘 초고효율 적층형 태양전지에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다.

그림 15는 MIT와 Stanford 공동연구팀에서 Perovskite top cell을 이용하여 연구중인 실리콘 적층형 태양전지의 구조를 나타낸 것으로 아래의 구조를 이용하여 13.7%의 초기효율을 얻었다.^[19]

이처럼 최근에는 초고효율 태양전지를 위해 기존의 실리콘 기판형 태양전지를 bottom cell로 사용하고 다양한 물질 및 형태의 top cell을 적용하는 형태의 연구가 활발히 추진되고 있다.

결론

2013년, 2014년에 걸쳐 ITRPV의 성장 전망치를 상회할 만큼 세계 태양광 시장은 지속적으로 성장하고 있으며 2015년까지 연평균 성장률을 18% 이상으로 전망하고 있다. 우리나라의 경우 신재생에너지 총 매출의 약 70%를 점유할 만큼 태양광 산업은 신재생에너지 분야의 핵심으로 자리매김 하고 있다. 시장점유율 측면에서 본다면, 향후에도 결정질 태양전지의 지속적인 기술소재개발과 투자로 높은 점유율이 예상되며, 박막을 이용한 이종접합 태양전지 및 적층형 태양전지 또한 효율향상 및 차세대 태양전지로서 꾸준한 성장이 전망된다.

결정질 태양전지 및 모듈의 경우, 지속적인 성장을 하고 있는 중국의 추격을 뿌리치기 위해서는 핵심요소기술과 설비개선 위주의 투자가 진행되어야 한다. 지금까지는 “Fast Follower”의 입장이었다면, 지금부터는 선택과 집중을 통한 “First Mover”의 역할을 수행하기 위해서 소재에서부터 공정, 셀, 모듈, 시스템까지 이르는 Value Chain의 최적화와 핵심기술 확보를 통한 시장 지배력을 확보할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 이민식, 황교민 “글로벌 태양광산업의 전망과 전략적 시사점”, 산은경제연구소, 2011.
- [2] Jessica Jin “Global PV Market Outlook”, HIS Technology, 2015.
- [3] M. A. Green, Prog. Photovolt: Res. Appl. 17, 2009, pp. 183–189.
- [4] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, S. Okamoto, IEEE Journal of Photovoltaics, 4, 2014, pp. 1433–1435.
- [5] “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2014 Results”, SEMI, 2015.
- [6] Y. Lee, B. Kim, S. M. Iftiqar, C. Park and J. Yi, “Silicon solar cells : Past, present and the future”, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 65, Issue 3, 2014, pp. 355–361.
- [7] “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2013 Results”, SEMI, 2013.
- [8] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, “A New Silicon p–n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power”, J. Appl. Phys, 25, 1954, pp. 676.
- [9] J. Zhao, A. Wang and M. A. Green “24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates”, Prog. Photovoltaics, 7, 1999, pp. 471.
- [10] 박철민, 조재현, 이영석, 박진주, 주만규, 이윤정, 이준신. “실리콘 태양전지의 기술현황 및 전망”, Current Photovoltaic Research, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 1–10.
- [11] M. Taguchi, Y. Tsunomura, H. Inoue, S. Taira, T. Nakashima, T. Bada, H. Sakata, E. Maruyama, “High-Efficiency HIT Solar Cell on Thin ($<100\ \mu\text{m}$) Silicon Wafer”, Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009, pp. 1690.
- [12] M. D. Lammert, R. J. Schwartz, “The Interdigitated Back Contact Solar Cell: A Silicon Solar Cell for Use in Concentrated Sunlight”, IEEE Trans. on Electron Devices, 24, 1977, pp. 337.
- [13] R. A. Sinton, Y. Kwark, J. Y. Gan, R. M. Swanson, “27.5-Percent Silicon Concentrator Solar Cells”, IEEE Electron Device Letter 7, 1986, pp. 567–569.
- [14] P. J. Cousins, D. D. Smith, H. Luan, J. Manning, T. D. Dennis, A. Waldhauer, K. E. Wilson, G. Harley and W. P. Mulligan, “Generation 3 : Improved Performance at Lower Cost”, IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th, 2010, pp. 275–278.
- [15] “Solion XP Ion Implanter : For Cost-Effective Advanced PV Cell Manufacturing”, Applied Materials, 2013.
- [16] http://news.panasonic.com/press/news/official_data/data_dir/2014/04/en140410-4/en140410-4.html
- [17] M. Konagai, “Future-PV Innovation Project Development of Si-Nano-wire Solar Cells”, Korea Photovoltaic Society (KPVS) Conference, 2013.
- [18] T. Sameshima, J. Takenezawa, M. Hasumi, T. Koida, T. Kaneko, M. Karasawa and M. Kondo, “Multi Junction Solar Cells Stacked with Transparent and Conductive Adhesive”, Japanese Journal of Applied Physics, 50, 2011, pp. 052301.
- [19] J. P. Mailoa, C. D. Bailie, E. C. Johlin, E. T. Hoke, A. J. Akey, W. H. Nguyen, M. D. McGehee and T. Buonassisi, “A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction” Applied Physics Letters, 106, 2015, pp. 121105.