

실리콘 태양전지의 기술현황 및 전망

박철민¹⁾ · 조재현²⁾ · 이영석¹⁾ · 박진주²⁾ · 주민규²⁾ · 이윤정²⁾ · 이준신^{1,2)*}

¹⁾성균관대학교 에너지과학과, 수원시, 440-746

²⁾성균관대학교 정보통신대학, 수원시, 440-746

Technology Trends and Prospects of Silicon Solar Cells

Cheolmin Park¹⁾ · Jaehyun Cho²⁾ · Youngseok Lee¹⁾ · Jinjoo Park²⁾ · Minkyu Ju²⁾ · Youn-Jung Lee²⁾ · Junsin Yi^{1,2)*}

¹⁾ Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²⁾ College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT: The current solar cell industry is experiencing a temporary plateau due to a sluggish economy and oversupply. It is expected that the solar industry can see similar growth to that of the recent past by overcoming the current situation, as there is growing demand globally for solar energy. The current situation led to restructuring of the world's solar industry, and domestic firms will need to have competitiveness through strategic approaches and proprietary technology to survive in the global solar market. Crystalline and amorphous silicon based solar cells have led the solar industry and occupied half or more of the market thus far. They will do so in the future PV market as well by playing a pivotal role in the solar industry. In this paper, the current status and prospects of silicon based solar cells, from materials to comprehensive and high efficiency technology that can emerge in the future, are discussed.

Key words: Silicon Solar Cell, Silicon Material, Crystalline Silicon, Thin-Film Silicon, Next Generation Solar Cell, High Efficiency Solar Cell

subscript

QSC : quasi-single crystalline

PERL : passivated emitter rear localized

HIT : heterojunction with intrinsic thin-layer

BCSC : buried contact solar cell

IBC : interdigitated back contact

LID : light-induced degradation

a-Si : amorphous silicon

μc-Si : micro-crystalline silicon

nc-Si : nano-crystalline silicon

MEG : multiple-exciton generation

1. 서론

세계 태양광산업은 2004년~2008년까지 연평균 54.7%의 높은 성장률을 기록했으나 유럽지역의 금융위기 이후 수요 위축

으로 2009년에는 15.9%로 성장률이 크게 둔화되었다. 2010년 독일과 이탈리아 시장의 폭발적인 성장(독일 10 GW 신설, 이탈리아 1.27 GW 신설¹⁾)에 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 처하면서 현 시점에서의 전반적인 태양광 시장은 정체기에 있다고 할 수 있다. 현재 태양광 시장은 수요 감소와 공급 과잉으로 인한 일종의 구조조정 기간을 거치고 있다고 본다. 그러므로 현 상황에서 품질과 가격 경쟁력이 떨어지는 업체는 이 구조조정이 불가피하다고 생각된다.

그러나 장기적으로는 과거의 유럽 중심의 태양광 수요가 미국과 중국 등 'G2국가'로 확대되면서 세계 태양광 시장은 지속적인 성장을 할 것으로 본다. 현재의 태양광 시장이 불황이라고 해서 세계적인 태양광에너지에 대한 수요가 감소한 것은 아니기 때문이다.

실리콘을 기반으로 하는 태양전지는 현재 태양전지 시장의 약 95% 이상을 차지하고 있다. 양자점, 나노 태양전지와 같은 차세대 태양전지 기술들이 개발되어지고 있으나 향후에도 태양전지 시장에서 실리콘 기반의 태양전지가 차지하는 비율은 과반을 상회할 것으로 예상된다. 따라서 이 글에서는 실리콘을 기반으로 하는 태양전지의 현황과 전망에 대해 기술하고자 한다.

*Corresponding author: yi@skku.ac.kr

Received March 20, 2013; Revised April 10, 2013;

Accepted April 18, 2013

2. 태양전지용 실리콘 웨이퍼의 소재기술 동향 및 전망

최근 수년간 양적인 성장을 지속해온 태양전지 산업은 80% 이상의 시장점유율을 가진 결정질 실리콘 태양전지 산업의 성장이었다. 그러나 2009년 글로벌 금융위기 이후에 결정질 태양전지는 공급이 수요를 초과하게 되었고, 이는 곧 태양전지 시장의 가격붕괴 현상을 초래하게 되었다. 이로 인하여 태양전지용 결정질 실리콘 웨이퍼 소재인 폴리 실리콘의 가격 하락이 시작하게 되었고, Fig.2.1에서 확인할 수 있듯이 현재 금융위기 이전의 가격 보다 약 4배 이상 하락하게 되었다.

태양전지용 폴리 실리콘의 가격이 하락하면서 고효율의 태양전지 웨이퍼 가격이 낮게 형성되어 그 결과 저효율의 저가 태양전지 웨이퍼 제조 기술인 리본(Ribbon) 웨이퍼의 제조 기술이 시장에서 사라지게 되었다³⁾.

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

Fig.2.2에서 볼 수 있듯, 고효율 태양전지를 위한 결정질 실리콘 웨이퍼의 제조비용을 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

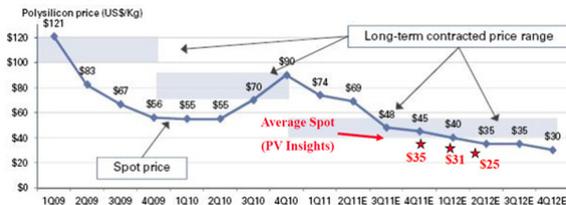


Fig. 2.1 기간별 폴리실리콘의 시장가격 변화²⁾

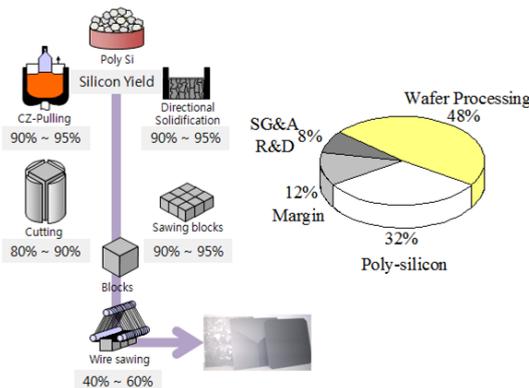


Fig. 2.2 태양전지용 웨이퍼 제조비용 분석

노력들은 Fig. 2.3, 2.4에서와 같이 주로 웨이퍼의 생산비용을 최소화하는 기술에 초점이 맞추어져 있다.

최근에는 Fig. 2.5와 같이 좋은 다결정 Casting 공법의 기술 개발을 통해 준단결정 실리콘 잉곳을 생산하는 고효율의 QSC 잉곳에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾.

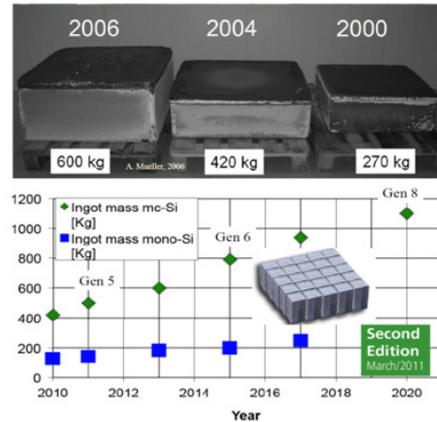


Fig. 2.3 잉곳의 생산기술 전망

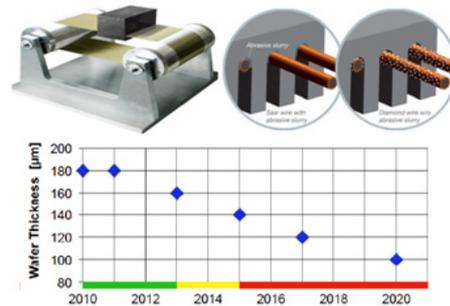


Fig. 2.4 웨이퍼 절삭기술 전망

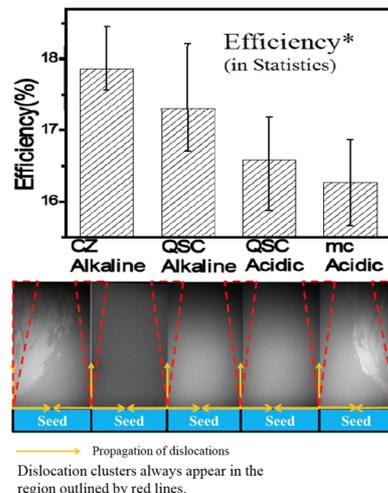


Fig. 2.5 결정성에 따른 태양전지 변환 효율과 QSC 공정기술의 개요

3. 결정질 실리콘 태양전지의 현황

결정질 실리콘 태양전지는 현재까지도 태양전지 시장에서 가장 많은 부분을 담당하고 있으며, 시중에 시판되는 태양전지 중에서 높은 효율 및 낮은 생산단가로 큰 이점을 지니고 있다.

결정질 실리콘 태양전지는 크게 단결정 (Single crystalline) 과 다결정 (Multi-crystalline) 으로 나뉘며, 기본적으로 p-n 동종 접합 (Homojunction) 으로서 태양전지에 사용된다. Fig 3.1에 연도별 실리콘 태양전지의 최고 변환효율 변천사를 도시하였다.

1950년대에 벨연구소에서 최초로 개발된 실리콘 태양전지⁵⁾는 90년도에 이르러서 호주의 UNSW (University of New South Wales) 대학에서 PERL 구조로 24%의 변환효율을 달성하였다⁶⁾. PERL 구조의 태양전지는 여전히 단결정 실리콘 태양전지 분야에서 최고의 효율을 기록하고 있으며, 초고효율 태양전지를 달성하기 위한 결정질 태양전지의 여러 가지 구조 중에서 가장 많이 거론되고 있는 구조이다(Fig 3.2참조).

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

위에서 언급된 바와 같이 연구실에서 개발된 초고효율 태양전지와 양산화를 목적으로 하는 태양전지 사이에는 효율 및 생산비용 부분에서 큰 차이가 있다. 양산을 목적으로 하는 일반적

인 구조의 태양전지의 경우 간단한 구조와 빠른 생산속도 및 저가화된 소재를 사용하여 와트 당 생산단가를 최소화하고 있다. 하지만 이런 일반적인 구조의 태양전지는 18~19%의 양산효율에 머무르고 있는 상황이라 25%의 변환효율을 갖는 초고효율 태양전지와는 여전히 큰 차이를 보이고 있다.

일반적인 구조를 갖는 양산형 태양전지의 효율을 극복하기 위해서 태양광기업들은 새로운 구조의 태양전지를 양산화하기 시작했는데 Fig 3.3에 정리된 것처럼, Sanyo사의 HIT, BP Solar사의 BCSC, Sunpower사의 IBC 태양전지가 대표적인 새로운 구조의 양산형 고효율 구조로 손꼽힌다⁷⁻⁹⁾.

Sanyo사의 HIT구조의 경우 비정질 실리콘을 이용해서 이종접합을 구현하였으며, Sunpower의 IBC셀은 모든 접합 및 전극형성을 후면으로 배치하여 전면에서 태양광의 흡수효율을 최대화하고 산화막을 이용하여 표면의 결함을 최소화하여 변환효율을 향상시켰다. BP Solar의 BCSC는 Laser Grooving 및 무전해 도금을 이용하여 기존 스크린 인쇄 전극형성에 비해서 높은 태양광의 흡수를 이루어 내었다.

일반적인 구조의 결정질 실리콘 태양전지와 비교했을 때, 위의 구조들은 높은 효율과 양산화를 동시에 확보할 수 있었지만, 복잡한 구조에 따른 전용장비의 사용 및 모듈제작에 있어서 상대적으로 비용적 문제점이 초래되었다. 이렇듯 새로운 구조의 태양전지들은 와트 당 생산단가와 변환효율의 상승이라는 두 가지 측면 사이에서의 Trade-off를 늘 고려해야 하는 상황이다.

또한 광열화현상(LID)에 의한 태양전지 및 모듈의 생산전력 감소 역시 Boron도핑 된 p-type기판을 쓰는 태양전지에서는 지속적으로 문제가 제기되고 있는 상황이다¹⁰⁾. 광열화현상에 의한 태양전지 및 모듈의 생산전력감소를 방지하기 위하여 기존에 p-type기판 위주로 형성되었던 태양광 시장이 n-type기판을 이용한 태양전지의 개발 및 양산으로 재편되고 있다^{11,12)}.

결정질 실리콘 태양전지 분야의 가장 큰 숙제는 고효율 태양전지를 낮은 생산단가로 제작하여 와트 당 생산단가를 낮추는 점이라고 할 수 있다. 그러기 위해서는 태양전지 내에서의 광학적·전기적 손실을 최소화하고, 고효율 태양전지 제조를 위한 공정의

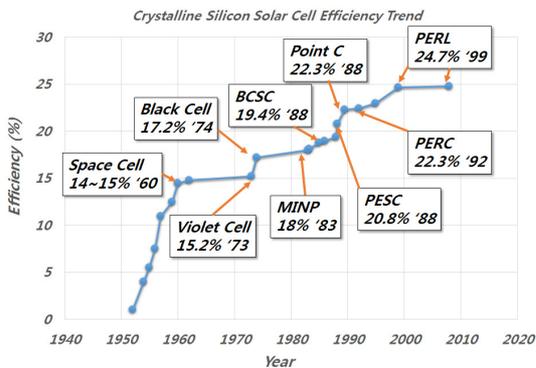


Fig. 3.1 실리콘 태양전지의 변환효율 변천사

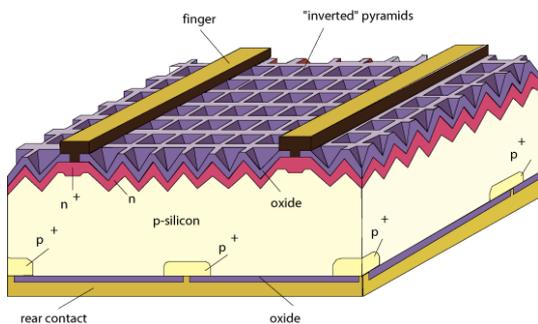


Fig. 3.2 24.7%의 변환효율을 기록한 PERL구조

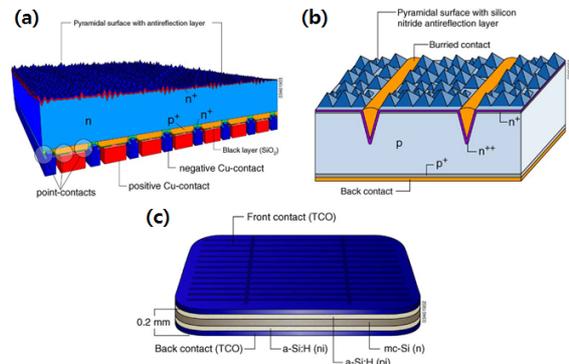


Fig. 3.3 다양한 구조의 양산형 실리콘 태양전지(a) IBC, (b) BCSC, (c) HIT

Table. 3.1 결정질 실리콘 태양전지의 기술전망

세부사항		년도	1990's	2000's	2010's	2020's	
			(300 wfs/h)	(1,000 wfs/h)	(2,500 wfs/h)	(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 R _s	Structure		Homogeneous Emitter	Homogeneous Emitter	Homogeneous Emitter + SE	SE, PERC, MWT, EWT	MWT, EWT, BIC, Tandem
	R _s (ohm/sq)		20	30	50	Low R _s -70 HighR _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

Table. 4.1 Records of thin film silicon technologies

Classification	Eff.(%)	Area(cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	Test Centre(DATE)
a-Si	10.1 ± 0.3	1.036	0.886	16.75	67	NREL(2009/07)
nc-Si	10.1 ± 0.2	1.199	0.539	24.4	76.6	JQA(1997/12)
a-Si/μc-Si(Tandem)	11.9 ± 0.8	1.227	1.346	12.92	68.5	NREL(2010/08)
a-Si/μc-Si/μc-Si(Triple)	13.4	1.006	1.963	9.52	71.9	NREL(2012/07)

Source : Solar & Energy, July 2011 and NREL PV efficiency chart

최소화 및 혁신적인 제조설비의 제작이 뒷받침 되어야 한다.

90년대부터의 결정질 실리콘 태양전지의 기술현황 및 전망에 대한 요약이 Table 3.1에 요약되어 있다. 위에서 언급한 것처럼, p-type을 위주로 형성된 결정질 실리콘 태양전지시장은 n-type을 기반으로 재편될 예정이며, 기존의 일반적인 태양전지 구조에서 벗어나 선택적 에미터 형성기술 및 후면 국부적 접합 구조가 일반적인 양산기술에 적용되어 양산화 및 고효율화가 진행될 것이다. 또한, 기존의 스크린 인쇄방식에서 벗어나 Plating 이나 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.

4. 박막 실리콘 태양전지 현황

4.1 박막 실리콘 태양전지 기술 현황

박막실리콘 태양전지는 접합구조에 따라 단일접합 (Single junction), 이중접합 (Tandem), 삼중접합 (Triple junction) 구조의 태양전지로 나눌 수 있다. 단일접합의 1세대를 시작으로 다중 접합의 5세대¹³⁻¹⁵⁾ 까지 진화하면서 6~7%대였던 효율이 R&D

수준의 16% (< 1 cm², 초기 효율)대까지 도달하였고, 특히 일본의 Kaneca는 8% 효율 이하에서 20 MW급 양산을 시작으로 4세대급 (11~12% 효율) Pilot 생산라인을 보유하여 양산기반을 구축하였다. a-Si을 기반으로 한 단일접합, 이중접합 구조 모두 Oerlikon 연구소의 기술이 독보적이며 각각 10.1 (1 cm²), 11.9% (1.227 cm²)의 효율을 나타내고 있으며 Kaneca가 2 μm 두께의 얇은 박막을 증착하여 nc-Si 구조의 박막 실리콘 태양전지로 10.1% (1.2 cm²)의 기술을 보유하고 있다. LG전자가 a-Si/μc-Si/μc-Si을 사용한 (1.006 cm²) 삼중접합 구조가 안정화 효율에서 13.44%¹⁶⁾ 기록(NREL 인증)을 보유하고 있다(Table 4.1 참조).

4.2 박막 실리콘 태양전지 시장 현황

실리콘 박막 태양전지의 많은 기술 개발에도 불구하고 아직까지 시장점유율 (5.1%, 2010 Solar & Energy)¹⁷⁾이 낮은 이유는 결정질 실리콘 태양전지에 비해 낮은 변화 효율과 낮은 생산 용량에 의한 것으로 분석할 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 첫째로 광 경로를 길게 하여 광흡수층 내에서 빛을 많이 흡수할 수 있도록 하는 광 캡처 기술 및 High Quality 다중 접합 구조 개발의 노력이 이루어지고 있다. 또한 박막 태양전지의 양산화에 대

Table. 4.2 Technology goals and key R&D issues for thin film silicon technologies

Thin film technology	2010– 2015	2015 – 2020	2020 – 2030
Efficiency targets in % (commercial modules)	10%	12%	15%
Industry manufacturing aspects	<ul style="list-style-type: none"> • High rate deposition • Roll-to-roll manufacturing • Packaging 	<ul style="list-style-type: none"> • Simplified production processes • Low cost packaging 	<ul style="list-style-type: none"> • Large high-efficiency production units • Availability of manufacturing materials • Recycling of modules
Selected R&D areas	<ul style="list-style-type: none"> • Large area deposition processes • Improved substrates and transparent conductive oxides 	<ul style="list-style-type: none"> • Improved cell structures • Improved deposition techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Advanced materials and concepts

Source : Technology Road map Solar photovoltaic energy, OECD, International Energy Agency (IEA) 2010¹⁸⁾

한 기술 확보를 위하여 대면적 박막 제조 시 박막의 균일도 확보, 대면적의 패터닝에 따른 손실 면적 최소화 등 대면적 모듈 일괄 공정 (Inline Turnkey) 생산을 위한 기술 연구 및 개발이 진행 될 수 있도록 국가적인 차원에서 계획, 추진 중에 있다. 하지만 우리나라의 경우 미국, 일본, 유럽 등에 비해 태양전지 기술 개발 및 양산화는 초기 단계에 머물러 있다.

그러나 박막 태양전지 분야는 현재 우리나라가 전세계적으로 선도하고 있는 반도체와 LCD 및 PDP 디스플레이 장비 및 소재 기술을 이용할 수 있고 이와 관련된 많은 인프라가 구축되어 있기 때문에 향후 박막 태양전지 분야의 원천기술과 양산기술에 대한 정부 및 기업의 투자가 이루어진다면 반도체 및 디스플레이 분야를 이어 우리나라를 선도하는 기술 및 사업 분야가 될 수 있을 것으로 기대된다. Table 4.2는 박막 태양전지 분야의 2030년까지 산업체 및 R&D에서 Key Issue 및 목표 효율이다.

5. 차세대 태양전지

5.1 양자점 태양전지

기존의 태양전지의 광전 변환 방법은 흡수되는 광자의 에너지에는 무관하고 오직 흡수된 광자의 수에 비례하여 전자-정공쌍을 생성하였다. 그리하여 높은 에너지를 가지는 광자의 남은 에너지가 열로 손실되므로 매우 비효율적이다.

최근 양자 점과 나노 기술을 이용하여 기존의 광전 변환 메커니즘의 비효율성을 개선한 신개념의 MEG 태양전지에 대한 연구 개발이 활발히 추진되고 있다. MEG는 높은 광에너지를 흡수하여 여기된 전자와 정공이 낮은 에너지 상태로 천이하면서 1개의 전자-정공쌍을 만드는데 (Fig 5.1(a)), 이때 낮은 에너지 상태로 천이되면서 발생한 에너지를 가전자대의 전자가 흡수하여 다시 전자-정공쌍을 만들어 2개 혹은 여러 개의 전자-정공쌍을 생성하는 (Fig 5.1(b)) 원리이다^{19,21)}.

MEG 광전 변환 메커니즘을 이용한 태양 전지는 기존 태양전지에 비해 빛 에너지를 보다 효율적으로 전기에너지로 전환이 가능하기 때문에 획기적인 효율향상을 기대할 수 있다.

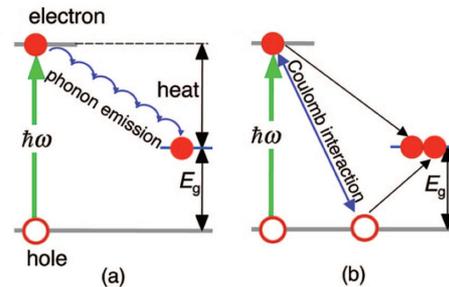


Fig. 5.1 (a) 벌크 상태 반도체에서 고에너지 전자가 포논을 방출하며 에너지를 잃는 과정, (b) 양자점에서 고에너지 전자가 다른 전자로 에너지를 전달하여 다른 전자-정공쌍을 형성하는 다중여기자 형성과정

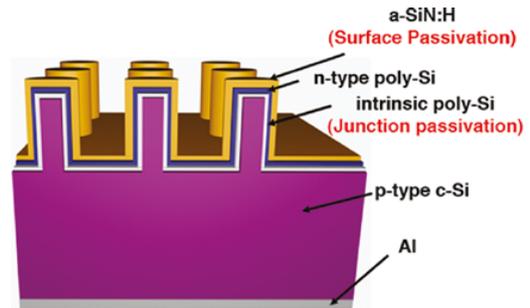


Fig. 5.2 실리콘 나노와이어의 태양전지 구조

5.2 나노와이어 태양전지

결정질 실리콘 태양전지의 경우 자외선 영역에서의 광흡수 계수가 작다. 그에 따라 표면적이 커서 광흡수율이 높고 효율적인 전하 분리 측면에서 장점을 가지는 실리콘 나노와이어를 이용한 태양전지가 유망한 구조로 부각되고 있다. (Fig 5.2참조)

실리콘 나노와이어에 입사된 빛은 와이어 내부에서 여러 차례 발생하는 반사로 인해, 빛이 이동하는 거리가 와이어 길이보다 길어져서 높은 광흡수를 가능하게 한다²²⁾. 이와 같이 빛의 이동경로를 높여주는 것이 나노 와이어의 주된 장점이다. 또 다른 효과로는 Radial 접합을 적용하였을 때 나노와이어의 지름 방향으로 움직이는 캐리어가 갖는 확산거리가 매우 짧아서 짧은 수명을 갖는 캐리어의 수집량을 증대시킬 수 있다²³⁾.

최근에는 고효율의 태양전지를 위해 나노와이어 태양전지를 기반으로 적층형 구조에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다²⁴⁾.

6. 결론

세계 태양광 시장은 2015년까지 연평균 성장률을 18%로 전망하고 있다. 우리나라의 경우 신재생에너지 총 매출의 약 70%를 점유할 만큼 태양광 산업은 신재생에너지 분야의 핵심으로 자리매김 하고 있다. 향후에도 결정질 태양전지의 높은 점유율이 예상되며, 박막 태양전지 또한 꾸준한 성장이 전망된다.

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

박막 태양전지의 경우 개발 진행 중인 적층형 태양전지 연구 기반을 바탕으로, 동작특성 규명, 단위 박막 및 계면 최적화, 열화특성규명 연구를 통한 태양전지의 효율향상 연구가 필요하며 정부 예산지원, 기업의 적극적인 참여, 연구소의 활발한 연구 개발을 통한 활성화가 이루어져야 한다.

결정질 실리콘과 박막의 균형적 개발 및 기술간의 융합, 반도체/디스플레이 기술의 인프라를 기반으로 한 실리콘기반 태양전지 기술개발 연구는 국가 경쟁력 확보를 이룰 수 있는 기술로 자리매김할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 이민식, 황교민 “글로벌 태양광산업의 전망과 전략적 시사점”, 산은경제연구소, 2011.
- “Global: Clean Energy: Solar Equity Research” Goldman Sachs Research estimates, 2011.
- J. P. Kalejs, “Silicon ribbons and foils – state of the art”, Sol. Energy mater. Sol. Cells, 72, 139-153, 2002
- X. Gu, X. Yu, K. Guo, L. Chen, D. Wang, D. Yang, “Seed-assisted cast quasi-single crystalline silicon for photovoltaic application: Towards high efficiency and low cost silicon solar cells”, Sol. Energy mater. Sol. Cells, 101, 95-101, 2012.
- 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, 676, 1954.
- 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, 471, 1999.
- M. Taguchi, Y. Tsunomura, H. Inoue, S. Taira, T. Nakashima, T. Bada, H. Sakata, E. Maruyama, Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1690, 2009.
- S. R. Wenham, C.B Honsberg, M. A. Green, “Buried contact silicon solar cells”, Sol. Energy mater. Sol. Cells, 34, 101-110, 1994.
- 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, 337, 1977.
- B. Lim, S. Hermann, K. Bothe, J. Schmidt, R. Brendel, Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1018 2008.
- A. Weeber, R. Naber, N. Guillevin, P. Barton, A. Carr, D. Saynova, T. Burgers, B. Geerligs, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 891, 2009.
- A. R. Burgers, L. J. Geerligs, A. J. Carr, A. Gutjahr, D. S. Saynova, X. Jingfeng, L. Gaofei, X. Zhuo, W. Hongfang, A. Haijiao, H. Zhiyan, P. R. Venema, A. H. G. Vlooswijk, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1144, 2011.
- X. X. Zheng, X. D. Zhang, S. S. Yang, S. Z. Xu, C. C. Wei, Y. Zhao, “Effect of the n/p tunnel junction on the performance of a-Si:H/ a-Si:H/mc-Si:H triple-junction solar cells”, Sol. Energy mater. Sol. Cells 101, 15, 2012.
- J. Yang, A. Banerjee, and S. Guha , “Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies”, Appl. Phys. Lett. 70, 2975, 1997.
- B. Yan, J. Yang, and S. Guha, “Amorphous and nanocrystalline silicon thin film photovoltaic technology on flexible substrates”, J. Vac. Sci. Technol. A 30, 04D108, 2012.
- http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- Photon International, March 2005 (<http://www.photonmagazine.com>)
- Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, OECD, International Energy Agency (IEA) 2010.
- R. D. Schaller and V. I. Klimov, “High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion”, Phys. Rev. Lett. 92, 186601 2004.
- M. C. Beard, R. J. Ellingson, “Multiple exciton generation in semiconductor nanocrystals: Toward efficient solar energy conversion”, Laser & Photon Review, 2, 377-399, 2008.
- R. J. Ellingson, M. C. Beard, J. C. Johnson, P. Yu, O. I. Micic, A. J. Nozik, A. Shabaev and A. L. Efros, “Highly Efficient Multiple Exciton Generation in Colloidal PeSe and PbS Quantum Dots”, Nano Letters, 5, 865-871, 2005.
- P. R. Bandaru and P. Pichanusakorn, “An outline of the synthesis and properties of silicon nanowires”, Semicond. Sci. Technol., 25, 024003, 2010.
- D. R. Kim, C. H. Lee, P. M. Rao, I. S. Cho, X. Zheng, “Hybrid Si Microwire and Planar Solar Cells: Passivation and Characterization”, Nano Lett. 11, 2704, 2011.
- M. Konagai, “FUTURE-PV Innovation” - Si Nanowire Solar Cells Aiming at 30% Efficiency”, 6th Int'l Photovoltaic Power Generation Expo, 2013.