

박형 결정질 실리콘 태양전지 기술 동향



강민구
한국에너지기술연구원
태양광연구실
선임연구원



최선호
한국에너지기술연구원
창의소재연구실
박사과정 학연연구생



장보윤
한국에너지기술연구원
창의소재연구실
책임연구원



강기환
한국에너지기술연구원
태양광연구실
책임기술원



이정인
한국에너지기술연구원
태양광연구실
선임연구원



송희은
한국에너지기술연구원
태양광연구실
책임연구원

요약

최근 태양광 시장은 생산량 증가와 제조단가 하락이 동시에 이루어지고 있으며 결정질 실리콘 태양전지가 시장을 주도하고 있다. 그 중에서도 결정질 실리콘 태양전지는 제조단가의 40% 이상을 차지하는 실리콘 원자재 비용을 줄이기 위해 두께를 줄이고자하는 노력에 관심이 집중되고 있다. 본 논문에서는 상용 결정질 실리콘 태양전지에서 사용되는 기술이 박형 결정질 실리콘 태양전지에 적용될 때 생기는 문제점과 이를 극복하기 위한 기술에 대해 박형 실리콘 웨이퍼, 박형 결정질 실리콘 태양전지, 박형 결정질 실리콘 태양전지 모듈 전반에 걸쳐 논하려고 한다.

개요

세계 태양광 산업은 2012년 30GW, 2013년 38 GW, 2014년 40 GW 등으로 생산량이 증가하고 있다.^[1] 태양전지의 생산량이 누적되어감에 따라 발전단가가 낮아지고 있으며(그림 1) 이에 따라 태양광발전의 그리드 패리티를 달성하는 지역이 늘어나고 있다. 한편, 태양광 산업에서는 태양전지의 고효율화, 금속전극의 재료 절감 등을 통해 제조 원가 절감을 이루었으나, 2012년 이후에는 제조 원가의 하락이 둔화되고 있다.

다양한 종류의 태양전지 중에서 현재 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지의 경우,

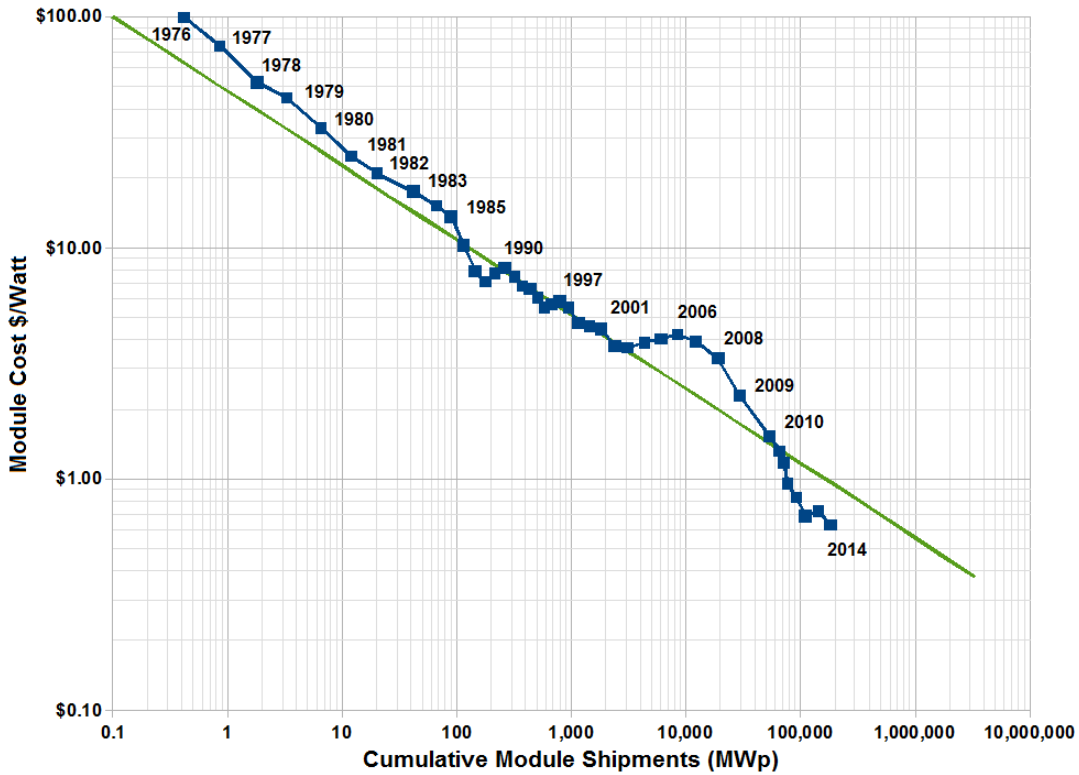


그림 1. 태양광 누적설치량에 따른 모듈 단가^[2]

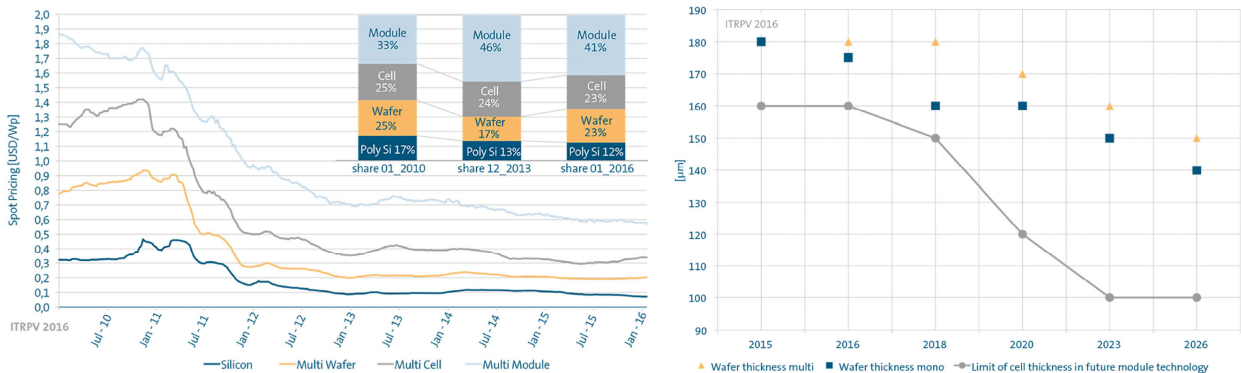


그림 2. 결정질 실리콘 태양전지 가격과 대량생산을 위한 최소 기판 두께의 예상 동향^[2]

그 밸류체인을 고순도 실리콘 원료로부터, 잉곳 및 기판, 태양전지 및 모듈로 나눌 수 있다. 이 중에서, 제조단계(모듈 기준)의 35% 정도를 차지하는 잉곳 및 기판은 가격을 결정하는 가장 중요한 구성 요소이다.

그림 2의 왼쪽 그래프는 위에서 설명한 밸류 체인 내 구성요소의 원가 동향을 나타낸 것이다. 2011년 이후 본격적인 원가 절감이 진행된 것을 알 수 있으며, 이러한 원가 절

감에 가장 큰 영향을 준 것은 폴리 실리콘 원료의 가격 하락과 기판 제조단계의 절감이다. 그림 3의 오른쪽 그래프는 기판의 두께 변화 예측 동향으로, 현재 상용화된 170~180µm의 두께가 지속적으로 감소하여 2026년도에는 140µm 까지도 두께가 감소할 것으로 예상하고 있다. 이와 같은 실리콘 기판의 두께 감소는 태양전지 저가화를 위한 핵심기술 중 하나이며, 일반적으로 초박형 실리콘 기판이라

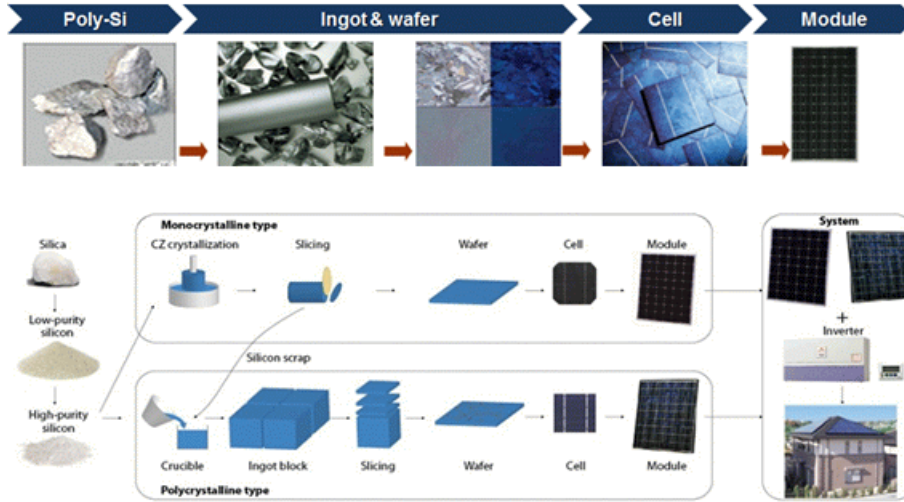


그림 3. 태양전지의 벨류체인 및 잉곳/기판의 제조과정

함은 100 μ m 이하의 두께를 갖는 기판을 의미한다.^[3]

실리콘 기반 태양전지는 다른 화석연료나 에너지원 뿐만 아니라 차세대 태양전지와의 경쟁을 위해 단가절감 및 효율 향상기술이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 박형 웨이핑 기술, 박형 태양전지 기술 및 박형 태양전지 모듈 기술에 대해 논하려 한다.

박형 실리콘 웨이퍼링

결정질 실리콘 잉곳 및 기판의 제조공정은 그림 3에 보인 바와 같이 고 순도 실리콘을 녹여 단결정(Monocrystalline) 또는 다결정(Polycrystalline)의 잉곳을 제조한 후, 와이어를 이용하여 얇게 절단하는 공정이다.

현재 결정질 실리콘 기판의 95% 이상이 그림 4에서 보이는 다중와이어절단기술이라 불리는 실리콘 잉곳 절단기술에 의해 제조된다. 가이드 롤러에 감겨 있는 수 백 가닥의 금속와이어 웹(Web) 표면에 실리콘보다 강도가 높은 입자를 붙여 고속으로 회전시킨다. 이 상태에서 실리콘 잉곳(그림에서 work material)을 위에서 아래로 이동시키면, 와이어 표면에 있던 고 강도 입자가 실리콘 잉곳을 톱질 하듯이 한꺼번에 수백 장의 기판으로 절단해 주는 것이다.

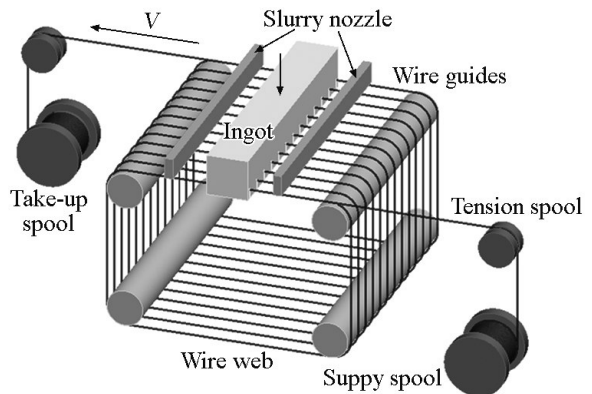


그림 4. 다중와이어 절단(multi-wire sawing)의 개념도^[3]

와이어 절단기술은 실리콘이 가지고 있는 근본적인 물성적 한계로 인해 실리콘의 파손을 쉽게 유발시킨다. 실리콘은 100% 공유결합이라는 강한 원자결합을 하고 있어 강도(Fracture strength: 6.8GPa)는 높지만,^[4] 특정 방향으로 쉽게 부서지는 특성을 가지고 있다. 이러한 취성은 실리콘을 절단할 때 매우 중요한 변수로 작용하여 기판이 쉽게 파손되고 결과적으로 태양전지의 가격을 낮추는데 걸림돌이 되었다.

다중와이어절단기술을 이용한 기판의 박형화 기술에 대한 연구는 2012년부터 꾸준히 수행되고 있으며, 연구실 수준의 소형 기판 뿐만 아니라 양산 크기인 156 x 156mm²

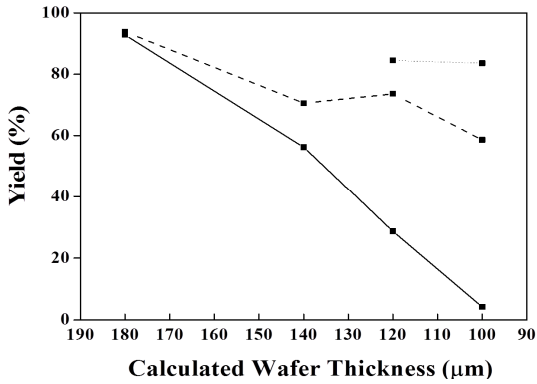


그림 5. 다중와이어절단공정에서의 두께에 따른 공정수율^[3]

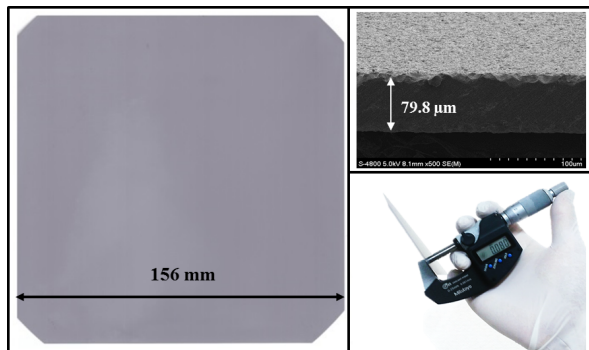


그림 6. 다중와이어절단공정으로 절단된 상용 면적(156 x 156mm²)을 가진 80μm 두께의 기판

의 기판 두께기준으로 100μm까지 보고되고 있다.^[5,6]

실리콘 기판이 180μm에서 100μm로 감소하면 동일한 크기의 잉곳에서 약 15.4%만큼 증가한 수의 기판을 생산할 수 있다. 그러나 기판의 두께가 얇아지면 그림 5에 보이

는 것과 같이, 약한 취성에 의한 파손이 더욱 빈번히 발생하여 기판 절단 도중 파손이 급증한다. 따라서, 박형화를 통한 기판의 생산수율이 15% 이상 증가하여도 파손에 의해 공정수율이 그 이상으로 감소한다면, 제조단가의 절감 효과는 없다고 할 수 있다. 결론적으로, 기판의 박형화 기술은 두께감소를 통한 생산 기판 수의 증가뿐만 아니라 파손을 저감이 병행되어야만 제조단가의 절감효과를 가질 수 있다.

그림 6은 한국에너지기술연구원에서 개발된 80μm 절단공정을 통해 제작된 기판이다. 기존 상용화두께(180μm)로부터 80μm까지 감소시키는데 성공하였으며, 추가적인 공정수율 향상에 대해 활발히 연구하고 있다.

현재 기술수준에서 상용 두께인 180μm의 기준에서 절단 손실은 약 40%이다. 절단 매체(와이어, 절단입자)의 두께가 동일한 상태에서 기판의 두께가 100μm까지 감소한다면, 이러한 절단 손실은 55% 이상으로 증가된다. 많은 연구자들은 절단손실을 최소화하거나 근본적으로 제거하려는 연구가 활발히 수행되고 있으며, 대표적인 무 절단손실(Kerf-free)기술로 exfoliation(stress-induced lift-off: slim-cut), ion-implantation, 그리고 porous-Si weak layer 등이 있다. 이를 통해 얻어진 초박형 기판의 두께는 보통 30~50μm로 알려져 있다.^[7]

대표적인 무 절단손실 결정질 실리콘 기판 제조기술인 exfoliation은 2008년 IMEC(벨기에)에서 제안된 제조기술

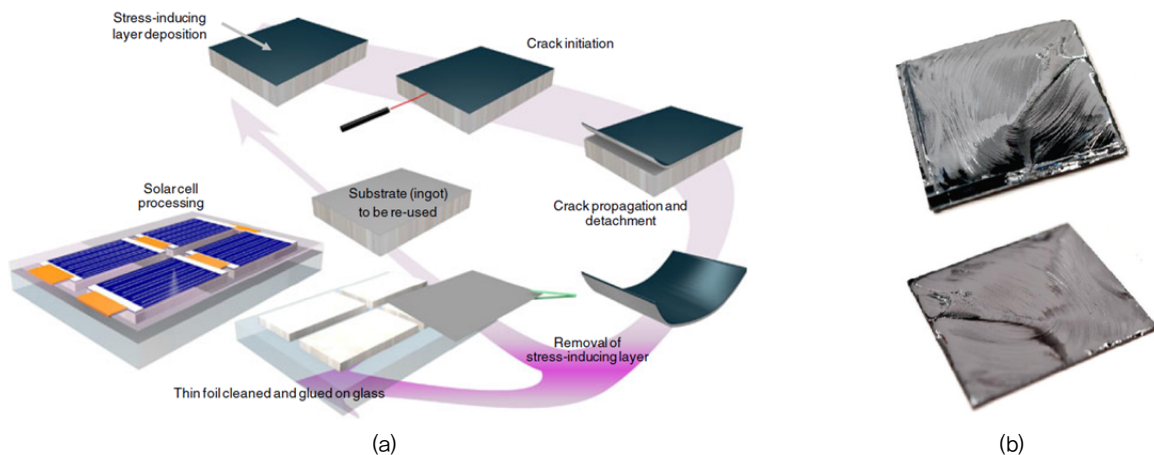


그림 7. (a) Exfoliation(Slim-cut)공정 개념도, (b) 이를 통해 제작된 기판 및 부모기판 이미지들

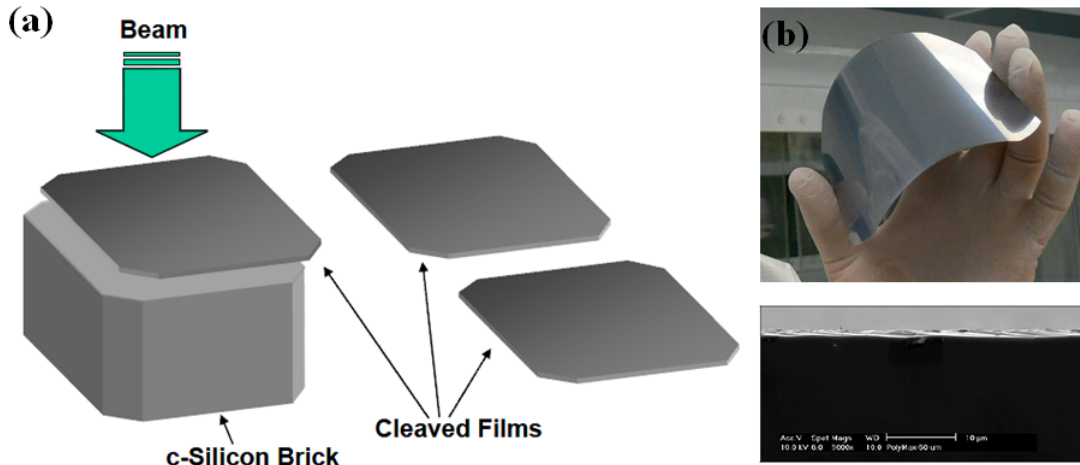


그림 8. (a) Ion-implantation의 개념도, (b) 이를 통해 제작된 웨이퍼와 그 웨이퍼의 주사전자현미경 단면이미지

이며, 그림 7에 개념도와 제작된 기판을 나타내었다. 실리콘 잉곳의 상부에 Al, Cu, Ni 혹은 epoxy 같은 실리콘과 열팽창계수의 차이가 큰 물질을 도포하고, 레이저 혹은 압자(Indenter) 등으로 균열 시작점을 형성한 후 열처리를 통해 미리 도포된 응력 유도층(Stress-induced layer)을 따라 기판을 박리시킨다. 이때, 박리된 기판은 세척과 접착 과정 등을 거쳐 태양전지로 제조된다. 반면, 박리되고 남은 잉곳은 그림 7의 (a)와 같이 일련의 과정을 다시 거친다.^[7,8]

그림 7 (b)의 이미지는 박리된 기판(상)과 상대 부모기판(relative parent substrate)이며, 기판의 면적은 40 x 40mm²로 아직은 상용화 기판 크기(156 x 156mm²)에 미치지 못한다. 또한 기판의 두께편차(total thickness variation: TTV)가 약 50μm인 점 등을 고려할 때, 균열의 전파와 탈착에 있어서 보다 정밀한 절단특성 제어가 필요할 것이다.

Ion-implantation (Direct film transfer: DFT)을 이용한 기판제조기술은 크게 hydrogen ion(proton) 주입과 박리 공정으로 구성된다. 그림 8은 Ion-implantation기판 제조 기술의 개념도와 이를 통해 제작된 웨이퍼와 그 두께를 나타내는 주사전자현미경 단면이미지이다.

Proton을 MeV급의 이온가속기를 통해 단결정 실리콘 잉곳의 표면에 고밀도(> 10¹⁷/cm²)로 주입시키는 단계에서 이온빔의 세기(가속 전압)에 비례하여 실리콘의 내부로

침투한다. 예를 들어, 약 2MeV의 가속전압 하에서 실리콘 표면으로부터 50μm의 깊이에 이온층이 형성된다. 이때, Proton 주입시간에 따라 주입된 이온량(dose rate)이 결정되며, 박리를 일으키는데 충분한 dose rate는 약 10¹⁵~10¹⁷ atom/cm²로 알려져 있다.^[9] 이와 같이 주입된 proton은 dose rate에 따라 내부에 다른 크기의 공극(bubble)을 형성하고, 열처리와 같은 추가적인 에너지 공급에 의해 공극들의 이동과 결합을 통해 그 크기는 점차 증가한다. 이때, 발생하는 공극들 사이의 균열과 균열의 전파로 인해 최종적으로 웨이퍼가 박리된다. 그림 8 (b)는 이러한 공정을 통해 제작된 웨이퍼와 이의 두께를 보여 주는 주사전자현미경사진을 보여 주고 있다. 기존 연구에 의하면, 웨이퍼의 거칠기와 두께 편차는 다중와이어절단공정을 통해 제작된 것에 비해 35% 이상 향상되었다고 보고되었다.^[10]

한편, porous-Si weak layer transfer라고 알려진 기술은 기화된 실리콘을 증착하여 직접 웨이퍼를 제조하는 기술로서, 공정 중 발생하는 원료손실이 매우 적으며 제조 단가를 획기적으로 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 9와 같이, 잉곳에 다공성 실리콘과 고밀도의 실리콘을 차례로 증착시킨 후 증착된 실리콘과 초기 블록을 분리하여 웨이퍼를 제조하고 블록을 재사용하는 이 기술로 제조된 웨이퍼의 두께는 약 10~30μm 정도이다.^[8] 보다 구체적으로, 실리콘 블록 위에 화학적 증착법을 이용하여

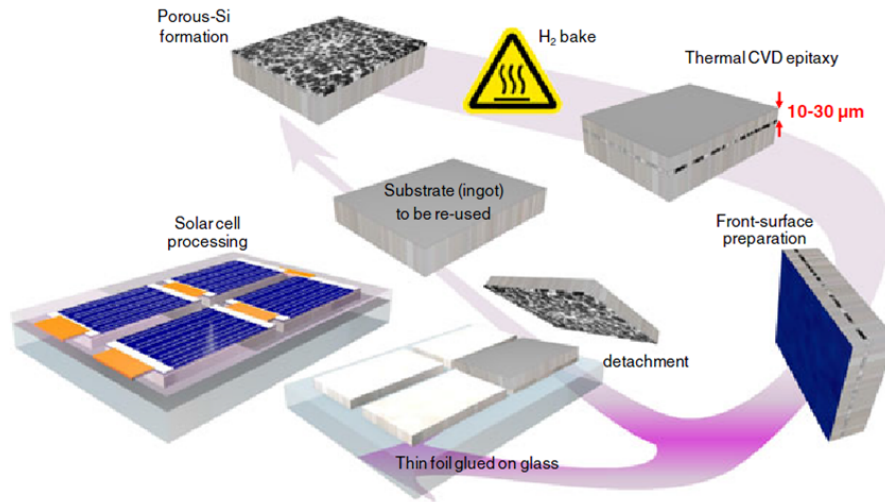


그림 9. Porous-Si weak layer transfer의 개념도

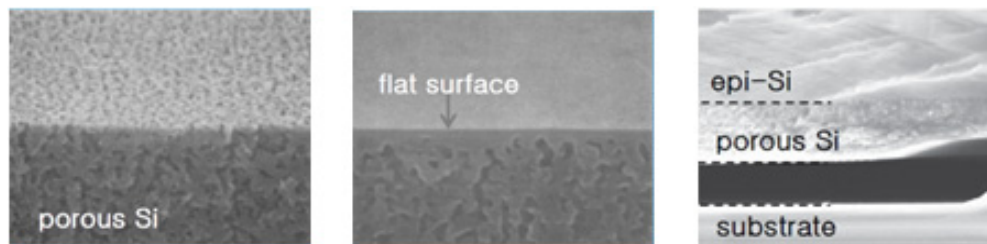


그림 10. Porous-Si weak layer transfer 기술을 이용하여 제작된 웨이퍼의 단면 이미지들

다공성 실리콘을 우선 증착시키고 이것을 다시 전해 식각시켜 전후면의 밀도의 기울기를 형성한다. 이때, 표면은 상대적으로 작은 공극률을 갖게 된다. 이후, 수소 열처리 공정을 통해 표면에 존재하는 산화규소를 제거하여 추후 발생할 수 있는 결정 결함을 예방한다. 그 다음으로 고온의 화학증착공정을 이용하여 에피택셜(epitaxial) 성장을 유도한다. 마치 응고과정에서 결정이 성장하듯 공극률은 점차 감소하여 그림 10에서 보이는 바와 같이 고밀도의 박형 실리콘 증착층이 형성되고, 증착층은 기계적인 힘으로 초기 블록과 분리되어 태양전지 제조공정에 사용되고 블록은 연속 재사용된다.

박형 실리콘 태양전지

기존 공정을 이용하여 태양전지를 제작할 경우 실리콘

웨이퍼의 두께가 얇아짐에 따라 태양전지의 휨현상에 의한 파손이 증가하게 된다. 결정질 실리콘 태양전지의 휨현상은 Si와 Si의 열팽창 계수 차이에 의해 생성되는데 실리콘 웨이퍼의 두께가 얇아짐에 따라 휨현상이 크게 나타나게 된다.

웨이퍼의 휨현상은 탄성체의 구성방정식, 에너지방정식 등으로 수치해석을 통하여 모델링 할 수 있다. 태양 전지의 휨 현상은 초기에 탄성영역 내에서 변하게 된다. 온도차, 즉 태양 전지의 초기온도와 외부온도의 차이가 크면 클수록 변형의 크기가 커지게 되는데, 온도차에 의해 유발된 응력이 임계 영역을 넘어가게 되면 소성변형을 일으키게 된다. 실리콘과 알루미늄의 접합에 필요한 일반적인 온도는 600°C 이상이고, 이 때 상온 25°C로 생각하면서 태양전지의 변형은 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가면서 변형을 일으키게 된다. 탄성 변형과 소성 변형은 서로 다른 경향을 보이며 탄성 영역 내의 변형은 식 (1)과 같이 나

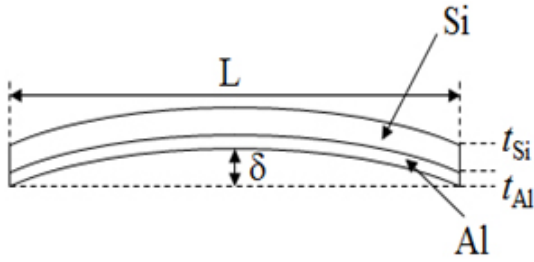


그림 11. 실리콘 태양전지 소성공정에서 실리콘과 알루미늄 두께와 휨 현상에 대한 개략도

타낼 수 있고, 실리콘과 알루미늄의 두께 및 길이, 그리고 변형량은 그림 11과 같이 설정된다.

$$\delta = \frac{3/4L^2(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})(T_f - T_{\infty})(t_{Al} + t_{Si})}{t_{Al}^2 \left(4 + 6 \frac{t_{Si}}{t_{Al}} + 4 \left(\frac{t_{Si}}{t_{Al}} \right)^2 + \frac{E_{Si}}{E_{Al}} \left(\frac{t_{Si}}{t_{Al}} \right)^3 + \frac{E_{Al} t_{Al}}{E_{Si} t_{Si}} \right)} \quad (1)$$

태양 전지의 변형이 탄성영역을 넘어 소성 영역으로 넘어가게 되면 변형량이 식 (2)와 같은 경향을 보인다고 알려져 있다.

$$\delta^* = \frac{3}{4} L^2 \frac{t_{AL}}{t_{Si}^2} \frac{\sigma_{Al, eff}}{E_{Si}} \quad (2)$$

위의 식은 1차원 변형이고 소성공정은 다양한 외부조건이 적용되기 때문에 실리콘의 탄성계수와 열팽창 계수, 그

리고 알루미늄과 재결정층의 탄성계수, 항복응력, 열팽창 계수를 변수로 시뮬레이션 툴을 사용하여 분석하면 웨이퍼 휨현상에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 알루미늄 층의 탄성계수와, 항복응력이라는 사실을 알 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해서는 알루미늄 페이스트의 물성을 개선하거나 현재 가장 널리 제작되고 있는 Si 후면전계 태양전지와는 다른 구조의 태양전지가 적용되어야 한다.

Passivated emitter and rear cell (PERC) 구조, passivated emitter, rear totally-diffused cell(PERT) 구조, 양면수광형 태양전지 구조는 그림 12와 같다. PERC 구조는 전면 에미터, 전면 패시베이션 층, 전면 전극을 가지고 있으며 후면에는 후면 패시베이션 층, 국부 후면전계, 후면 전극으로 이루어진다. PERT 구조는 PERC구조와 유사하지만 국부 후면전계 대신 전체 후면전계를 갖는다. 양면수광형 구조는 PERT구조와 유사하지만 후면 전극이 전면 전극과 같은 H-패턴을 가지고 있다.

PERC 구조와 PERT 구조의 경우에는 후면 전체에 전극이 형성되어 박형 태양전지의 휨현상 개선에 도움이 되지 않지만 양면수광형 구조의 경우에는 전면과 후면에 금속 전극이 H패턴으로 이루어져 열팽창 계수 차이에 의한 휨현상이 거의 일어나지 않는다는 장점을 가지고 있다. 웨이퍼 휨현상을 제거하기 위한 다른 방법으로 완성된 태양전지를 저온 처리를 하여 소성공정 중 형성된 휨현상을 제거하는 방법이 있다. 이는 휨현상이 일어나는 현상을 반대로

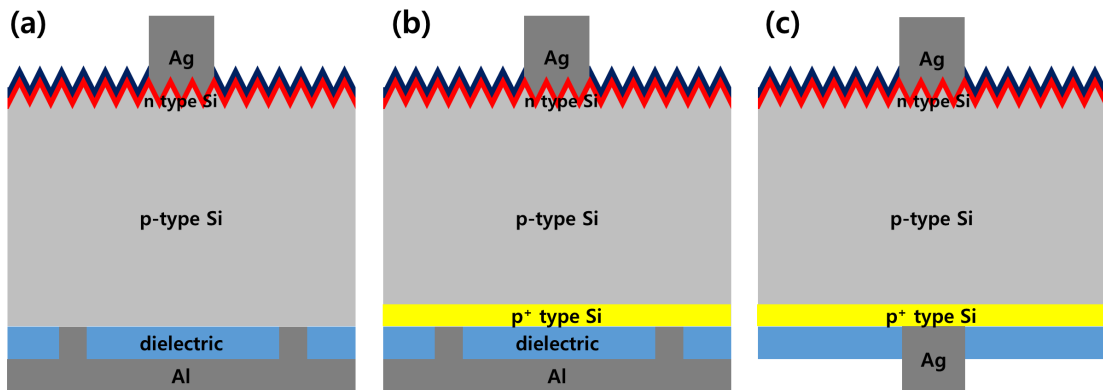


그림 12. (a) passivated emitter and rear cell 구조 (b) passivated emitter, rear totally-diffused cell 구조 (c) 양면수광형 구조의 단면도

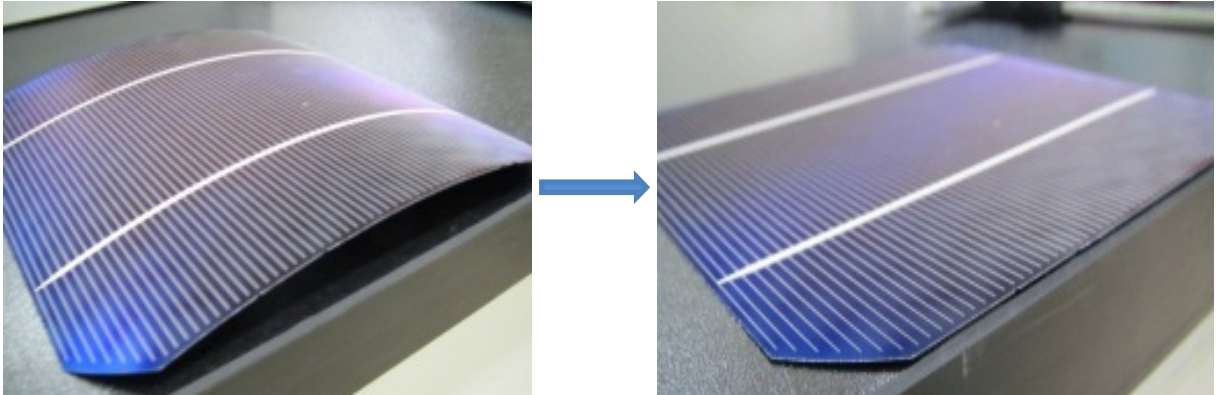


그림 13. 저온 처리전과 후의 Si 후면전계 태양전지

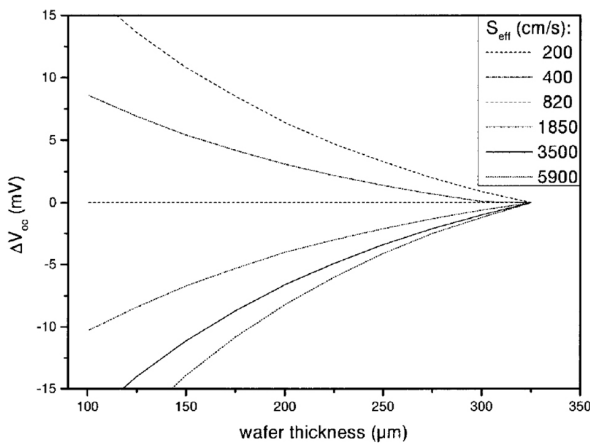


그림 14. 웨이퍼 두께와 표면재결합 속도에 따른 개방전압 변화^[1]

이용한 것으로 상온보다 낮은 온도로 열처리를 하게 될 경우 금속 전극이 실리콘 기판보다 더 수축하게 되어 상온으로 돌아왔을때 휨현상이 제거된다. 그림 13은 저온 처리전과 후의 Si 후면전계 태양전지의 사진이다.

실리콘은 흡수계수가 800nm 이상의 파장에서 10^3cm^{-1} 이하로 낮아져 실리콘의 두께가 얇은 박형 실리콘 태양전지는 파장이 800nm 이상인 빛의 흡수가 충분하지 못하여 광 생성 전류가 줄어 발전능력이 저하된다. 두께가 얇아져 빛흡수가 작아지는 것을 극복하는 방법으로는 빛의 경로를 수직방향에서 사선방향으로 바꾸어주는 방법과 태양전지의 후면에 도달한 빛을 반사시켜 빛의 경로를 늘려주는 후면 반사막 형성법이 있다. 빛의 경로는 바꾸는 방법으로는 텍스처링법이 있는데 단결정 태양전지의 경우 습식 텍

스처링법을 이용하기 때문에 빛의 입사각도를 바꾸는 것이 어렵다. 따라서, 박형 실리콘 태양전지에서는 후면반사율을 높여 빛의 흡수를 높이는 방법을 사용한다. 후면 반사막에 사용될 수 있는 물질은 SiO_2 , Al_2O_3 , SiN_x 등이 있다. 이와 같은 후면반사막은 상용 결정질 실리콘 태양전지 구조인 Si 후면전계 태양전지의 후면반사도인 약 60 %보다 높은 약 90%정도의 후면반사도를 갖으며 후면 재결합율 또한 수백 cm/s 에서 수십 cm/s 으로 낮아지게 되어 태양전지의 효율이 향상되는 장점을 가지고 있다. 이를 구현할 수 있는 대표적인 구조로 passivated emitter and rear cell (PERC) 구조와 passivated emitter, rear totally-diffused cell(PERT) 구조 그리고 양면수광형 태양전지 구조 등이 있으며, 높은 패시베이션 특성을 갖는 경우에는 두께가 얇아짐에도 개방전압이 향상된다는 보고가 있다.

박형 실리콘 태양전지 모듈

일반적인 실리콘 태양전지 모듈공정은 태양전지 전극과 리본전극을 연결한 후, 요구되는 전압을 얻기 위하여 각 태양전지를 전기적으로 연결하는 tabbing과 string 공정을 우선적으로 진행하며, 다음으로 이를 유리기판, 봉지재, 태양전지, 봉지재, 후면재 순으로 적층하고 외부 전극을 형성하는 lay-up공정이 이루어진다. 마지막으로 적층된 모듈은 열과 압력으로 봉지재를 가교시켜 태양전지와 외부

표 1. Solder 합금성분의 물리적 특성^[12]

Solder Alloy	Melting Point solidus/liquidus	Density g/cm ³	Electrical Resistivity μΩ-m	Thermal Conductivity W/m-K
Sn63Pb37	183/183	8.4	0.145	50
Sn60Pb40	183/191	8.5	0.153	49
Sn96.5Ag3.5	221/221	7.37	0.123	55
Sn96.5Ag3.0 Cu0.5	217/220	7.38	0.132	58

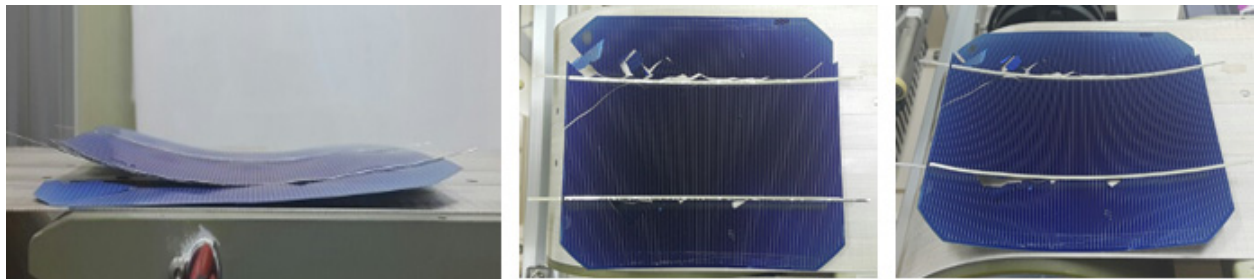


그림 15. 기존 tabbing 공정 적용 시 초박형 태양전지의 파손

환경과 차단시키는 lamination 작업 후에 프레임을 장착하고 정션박스를 부착함으로써 완성된다.

그러나, 위와 같은 기존의 공정방식을 적용하여 초박형 태양전지를 모듈화 할 경우, tabbing과 string 공정은 태양전지의 파손이나 휨현상으로 인해 공정 상의 어려움이 발생한다. 먼저 기존의 tabbing 방식을 살펴보면, 열원의 종류에 따라 열풍을 통해 리본을 납땀하는 hot air 방식, 리본에 전류를 흘려 납땀하는 current welding 방식, 비접촉식 IR lamp를 이용해 리본을 납땀하는 방식 등으로 구분할 수 있다.

리본전극은 일반적으로 구리동선에 solder 합금성분이 코팅된 형태로, solder 합금성분으로 리본을 구분하면 표 1과 같이 Sn-Ag계와 Sn-Pb계 solder로 나눌 수 있다. 이 때, solder의 용융온도는 Pb가 포함될 경우 200°C이내에서 용융되지만 Pb가 없는 Pb-free리본의 경우 210°C 이상에서 용융되어 납땀이 가능해진다.

태양전지와 리본의 tabbing 공정은 전면의 열을 이용하여 짧은 시간(약 2초) 이내에 이루어진다. 이 때, 태양전지 전면과 후면의 리본전극은 동시에 납땀되며, 실제 태빙 시 전면 리본 전극의 온도는 약 400°C가 된다. 따라서 열 팽창계수가 다른 리본과 태양전지는 tabbing 공정 이후 상

온으로 냉각되는 과정에서 리본전극과 태양전지 접합 부분에 물리적인 힘이 지속적으로 가해져 태양전지의 휨현상이 발생하거나 심하면 태양전지가 파손되는 문제가 생긴다.^[13-15] 결과적으로 기존 tabbing 공정을 적용한 초박형 태양전지는 tabbing 이후 리본전극의 수축력을 태양전지가 견디지 못하여 그림 15에서와 같이 태양전지가 파손되는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 초박형 태양전지의 경우 열에 의한 리본의 팽창을 최소화시키기 위해 저온에서 tabbing하는 방법으로 태양전지와 리본의 납땀이 이루어져야 된다. 하지만, 기존의 리본에 의한 solder 성분을 녹여 납땀하는 방식은 상당히 높은 온도에서 tabbing이 이루어지므로 100μm급 이하 태양전지에 적용하기에는 한계가 있다. 그러므로, 저온 tabbing을 위해서는 리본전극과 태양전지 사이에 기존 리본의 solder 성분보다 녹는점이 낮은 물질을 이용하여 태양전지와 리본을 전기적으로 연결하여야 한다.

한국에너지기술연구원에서는 tabbing 공정 중 웨이퍼 파손을 막기 위해 lamination 공정 중의 최고온도(약 150°C)에서 태양전지와 리본의 전기 전도성을 가지는 H사의 전도성 페이스트를 이용하여 모듈을 제작한 바 있다. 제작된 모듈은 초박형 태양전지 24장으로 구성되었으며, 이 때 사

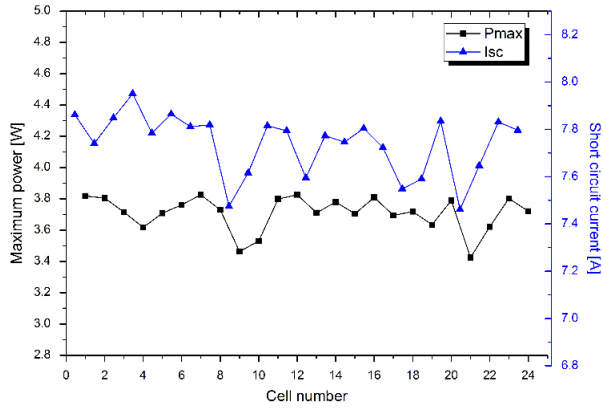


그림 16. 모듈 제작에 사용된 초박형 태양전지의 전기적 특성

용된 태양전지의 출력 및 단락전류는 그림 16과 같다. 그 결과, 각 모듈에 사용된 태양전지 출력의 합은 88.0W로 평균 15% 이상의 발전 효율을 가지는 것을 확인하였다.

모듈 제작은 그림 17과 같이 각각의 태양전지 전·후면에 전도성 페이스트를 도포한 후 리본전극을 정렬하고 200°C의 열을 가하여 리본과 태양전지를 물리적으로 접착시킨 상태로 string을 형성하였으며, 전면유리, EVA, 백시트를 순차적으로 적층하여 lay-up한 이후 lamination 공정을 진행하여 완성하였다.

그림 18은 lamination 이후 제작된 초박형 태양전지 모

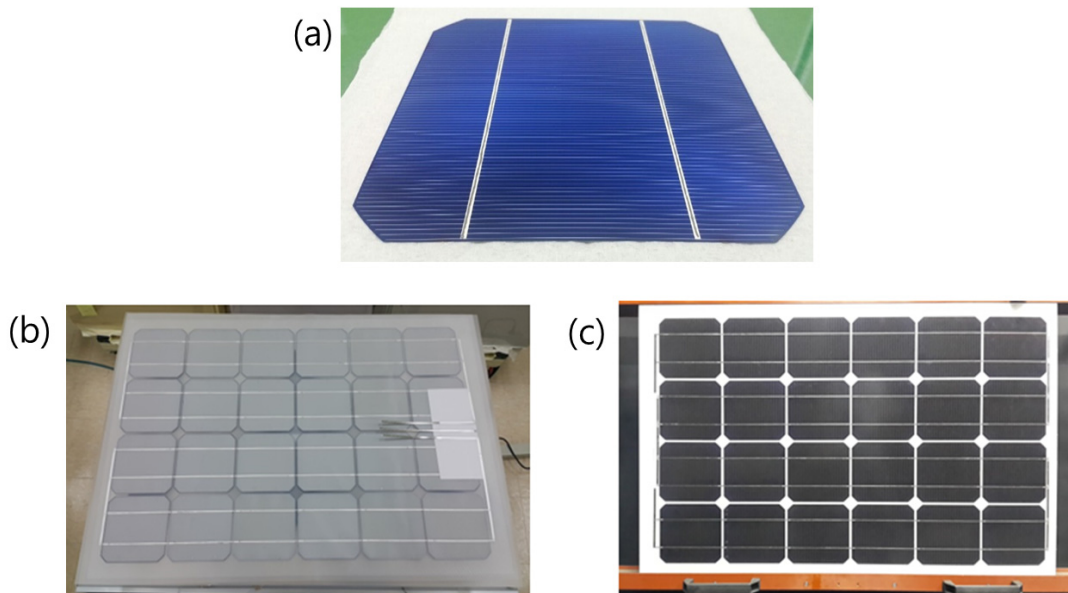


그림 17. 초박형 태양전지 모듈 제작 과정 (a) 전도성 페이스트가 도포된 초박형 태양전지 (b) Lay-up 공정 (c) 완성된 모듈

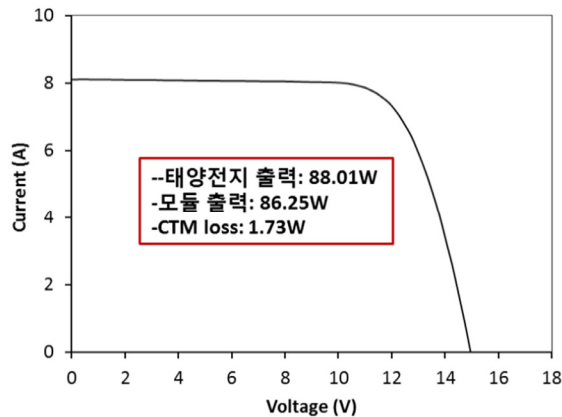


그림 18. 완성된 모듈의 출력

들의 전기적 출력 결과로서, 이를 통해 공정 중 발생할 수 있는 태양전지 파손 및 전기적 특성 변화를 확인하였다. 측정된 모듈의 출력은 86.25W로 태양전지 대비 모듈 출력이 약 1.73W정도 줄었지만 이는 2% 정도로서 일반적인 모듈 CTM loss 범위 안에 있는 결과이다.

결론

전세계적으로 태양광산업은 이미 기존 발전원에 비해 발전단가가 우월해지는 시기가 도래했거나 도래하고 있으며 이를 가속화하기 위해서는 제조단가 절감이 필수적이다. 이를 위해 현재 제조단가의 40% 이상을 차지하고 있는 웨이퍼의 두께를 감소시키는 연구가 진행되고 있다. 웨이퍼의 박형화를 위해서는 두께 감소에 의한 파손율 증가를 막아야하며, 절단 손실을 줄여야 한다. 이를 위한 방안으로는 웨이퍼의 절단 공정 개선과 무절단손실 공정인 exfoliation, ion-implantation을 이용한 박리공정 등이 연구되고 있다. 한편, 박형 태양전지 제조를 위해서는 웨이퍼 두께 감소로 인한 빛흡수 감소를 해결하고자 단락전류 개선을 위한 후면반사방지막 적용 연구가 이루어지고 있다. 뿐만 아니라, 박형 태양전지의 휨현상 개선을 위해서는 기존의 상용 결정질 실리콘 태양전지 구조를 양면수광형 구조로 적용하거나 저온처리기술을 적용하는 연구도 진행 중에 있다. 모듈 공정에서도 기존의 tabbing 공정 중 열에 의한 파손이 많기 때문에 전도성 페이스트를 이용한 연구가 진행되고 있으며, 이를 통해 기존의 공정과 비슷한 결과를 얻고 있다.

태양광산업은 이미 200 μm 두께의 기판에서 180 μm 두께의 기판으로 옮겨가고 있으며 2023년 이후에는 모듈공정에서 100 μm 두께의 기판도 사용가능할 것으로 예측되고 있다. 박형 웨이퍼를 이용한 결정질 실리콘 태양전지는 웨이퍼링부터 모듈까지의 연구가 진행중으로, 파손율 저감뿐만 아니라 효율 향상에 초점을 둔 연구가 진행되고 있으며 파손율 저감뿐만 아니라 효율 향상에 초점을 두고 연

구가 진행이 되고 있으며 향후 양산화 적용을 위한 연구 개발이 더욱 활발히 진행될 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018.
- [2] “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2015 Results,” SEMI 2016.
- [3] S. Choi, B. Jang, J. Kim, H. Song, T. Baek, M. Han, Solar Energy, 122, 2015, pp. 1170.
- [4] P. Rupnowski, B. Sopori, International journal of fracture, 155(1), 2009, pp. 67.
- [5] B. Weberm, S. Riepe, “Changes of the Multi Wire Sawing Process for Thin Wafers below 120 μm Thickness,” European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012.
- [6] S. Choi, B. Jang, J. Kim, H. Song, M. Han, Solar Energy, 125, 2016, pp. 198.
- [7] F. Dross, K. Baert, T. Bearda, J. Deckers, V. Depauw, El Daif, I. Gordon, A. Gougam, J. Govaerts, S. Granata, R. Labie, X. Loozen, R. Martini, A. Masolin, B. O’ Sullivan, Y. Qiu, J. Vaes, D. V. Gestel, J. V. Hoeymissen, A. Vanleenhove, K. V. Nieuwenhuysen, S. Venkatachalam, M. Meuris, J. Poortmans, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 20(6), 2012, pp. 770.
- [8] R. Martini, M. Gonzalez, F. Dross, A. Masolin, J. Vaes, D. Frederickx, J. Poortmans, Energy Procedia, 27, 2012, pp. 567.
- [9] J. Lee, C. Lee, H. Song, B. Jang, W. Yoon, Nanosci. Nanotechnol. Lett., 8, 2016, pp. 62.
- [10] F. Henley, S. Kang, Z. Liu, L. Tian, J. Wang, Y.L. Chow, “Kerf-Free 20–150 μm c-Si Wafering for Thin PV Manufacturing” European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2009.
- [11] C. J. J. Tool, A. R. Burgers, P. Manshanden, A. W. Weeber, B. H. M. van Straaten, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10, 2002, pp. 279.
- [12] Paul Boltoff, “Solder Alloys: physical and Mechanical

Properties,” www.alasir.com/reference/solder_aloosys, 2010.

- [13] Y. Zemen et al., “The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module,” 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Spain, 2010, pp. 4073–4078.
- [14] Andrew M. Gabor et al., “Soldering induced damage

to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules,” 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, 2006, pp. 2042–2047.

- [15] J. Wendt et al., “The link between mechanical stress induced by soldering and micro damages in silicon solar cells,” 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany, 2009, pp. 2420–3423.

