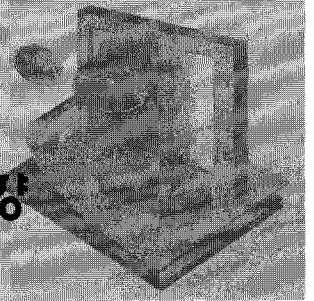


## 결정질 실리콘 태양전지 기술개발 동향



장효식 선임연구원 (한국세라믹기술원 이천분원 엔지니어링세라믹센터 태양전지실)

## 1. 서론

최근 영하 10도 이하의 온도로 지속되고 있는 이상 한파의 원인은 지구 온난화로 북극이 따뜻해지면서 북극권에 갇혀 있어야 할 찬 공기가 아래로 이동한 것을 꼽고 있으며 북극의 빙하 면적이 점점 줄고 있는 것으로 예측되었다. 2004년 개봉한 롤랜드 에머리히 감독의 영화 투모로우에는 심각한 온난화를 겪고 있는 지구인들에게는 해빙에 따른 재앙이 그저 상상 속에만 있는 것이 아니라는 메시지를 던져주고 있다. 이런 지구온난화 위협을 줄이고자 하는 노력들이 기후변화협약으로 추진되고 있고, 각종 환경규제 및 관련규약은 제품생산에 있어서 온실가스의 배출량을 최소화하도록 유도하고 있어 에너지 다소비국 중에 하나인 우리나라로서는 국가경쟁력 향상과 에너지 자원의 고갈 대비를 위해 신재생 에너지원의 독자적인 개발이 절실히 요구되고 있는 상황이다. 화석연료의 높은 대외의존도를 나타내고 있는 우리나라는 이상 한파와 중국 등 개발국가의 화석연료량 사용증가로 유가가 상승하여, 막대한 에너지 수입에 따른 무역수지악화의 해소와 함께 향후 지속적인 개발에 필요한 에너지원의 확보가 오래전부터 국가적인 문제로 인식되어 왔으며, 앞으로 새로운 에너지원의 확보가 국가의 흥망성쇠를 결정할 수 있을 정도로 에너지의 중요성이 증대되고 있다.

신재생에너지란 태양에너지, 풍력, 연료전지, 바이오에너지 등 온실가스를 미량 배출 (CO<sub>2</sub> 배출량

이 약 3,000 kg/100 Mh 이하)하는 청정에너지원을 말하는데, 2004년에 전체 에너지 중 신재생에너지 비중은 13% 수준에 불과하지만 환경위기에 대한 세계적인 공감대 형성과 정부차원의 적극적 지원 등에 힘입어 2020년에는 전체 에너지의 35%까지 증가할 것으로 추정되고 있다. 신재생에너지 중에 태양에너지는 무한하고 에너지원의 크기가 가장 크며, 원자력 발전과 같은 위험 요소도 없어서 가장 이상적인 대체 에너지로 여겨지기 때문에 태양전지는 산업화 가능성이 가장 높은 대체에너지원으로 부각되고 있다.

유럽태양광산업협회 (EPIA)의 2010년 세계 태양광 시장 전망에 따르면 2006년 1.6 GW이었던 것이 2009년 7.2 GW로 급성장하였으며 2010년 15.5 GW, 2014년 30 GW로 태양광 시장 규모가 지속적으로 고성장할 것으로 예측되고 있다. 지난 2000년 278 MW에 불과했던 전 세계 태양광 시장이 10년 만에 무려 60배나 성장했다. 업체별로는 미국의 퍼스트 솔라사가 1,260 MW 규모의 CdTe 박막 태양전지로 세계 1위에 올라섰으며, 중국의 선택이 1.25 GW 규모로 2위, JA 솔라가 1.05 GW 규모로 3위, 샤프가 1 GW 규모로 4위를 점하고 있다. 현재, 세계 10위권 업체에 한국업체들은 들지 못하고 있으며 국내 선두업체의 생산규모는 370 MW 수준이다. 하지만, 국내업체들이 대규모 증설을 추진하고 있어 2012년경에는 10위권 업체들이 등장할 것으로 예측 된다. 2010년 국내 태양광업체들의 매출이 6조 5천억 원을 넘어 전년 대비 2.5배 증가하였고 수출비중은 70%에 달해 고용창

출과 수출효자 종목으로 성장 중에 있다 [1,2].

태양광 발전 시스템은 태양전지들이 모여서 전기를 생성하는 모듈과 생산된 전기를 보관하는 축전지, 그리고 전력을 조정하는 인버터로 구성된다. 태

양전지는 크게 실리콘계와 비실리콘계 또는 결정질과 박막태양전지로 구분할 수 있다. 결정질 실리콘 태양전지는 현재까지 태양전지 시장의 80% 이상을 점유하고 있으며, 실리콘 자원의 풍부함으로 인해 결정질 실리콘 태양전지의 지속적인 성장이 예측되어진다. 태양광발전의 핵심 기술은 태양으로부터의 에너지를 전기에너지로 전환하는 태양전지 소자의 변환 효율을 향상 시키는 것이고 이의 제조원가를 낮추는 것이다.

태양전지의 동작원리는 광기전력 효과를 이용한다. 반도체 구조 내에 p-n접합이 생성되어 있으면 확산 혹은 Drift 효과에 의해서 생성된 전자와 정공의 분포의 평형이 깨져서 기전력이 발생하는 현상을 광기전력 효과라 한다. 즉, 빛에너지를 흡수하여 캐리어(전자, 정공)가 생성되고, 생성된 전자와 정공은 pn 접합의 전위차에 의해서 분리되어 전극으로 수집됨으로써 전류를 흐르게 한다 (그림 2). 현재의 태양전지 기본 형태를 이루는 최초의 실리콘 태양전지는 1954년 D. M. Chapin과 Bell 연구소에서 개발되어 4.5%의 변환효율을 얻었다. 변환 효율의 증가는 새로운 구조의 태양전지 개념과 함께 계단형태의 모양으로 발전되어와 지금의 단결정 실리콘 태양전지는 20%대에 이르고 있다. 실리콘 태양전지는 이제 거의 기술적인 한계에 온 것처럼 보이지만 이론적인 한계가 33%로 볼 때 아직도 발전 가능성 많다고 할 수 있다.

본 리뷰에서는 결정질 실리콘 태양전지의 제조 공정, 연구동향, 국내연구기관에 관한 관련 정보를 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 결정질 실리콘 태양전지 제조공정

결정질 실리콘 (실리콘 벌크) 태양전지는 단결정 (Single crystal) 형태와 다결정 (Multi-crystalline) 형태의 재료로 나뉘며 기본적으로 p-n접합 (Junction)으로써 태양전

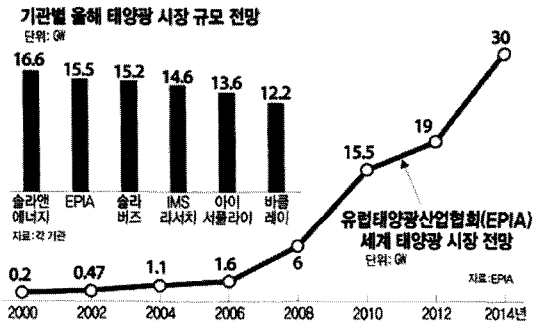


그림 1. 2009년 이후의 전 세계 태양광 시장 규모 전망치.

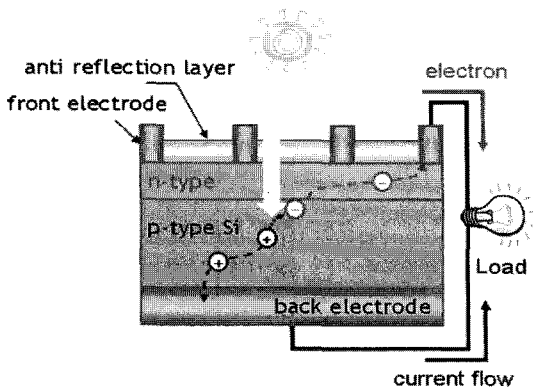


그림 2. 결정질 실리콘 태양전지의 동작원리.

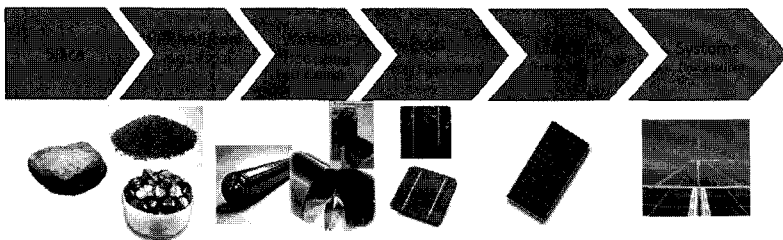


그림 3. 태양광 발전의 제작과정.

지에 사용된다. 태양전지의 원료부터 태양광 발전까지의 순서를 그림 3에 나타내었다. 전형적인 결정질 실리콘 태양전지의 제조공정은 모래 등 실리콘을 포함한 원재료를 정제하여 폴리실리콘을 뽑아내는 과정부터 시작한다. 이후 폴리실리콘을 정제하여 잉곳을 만든 후 이를 절단하여 단결정 혹은 다결정 실리콘 웨이퍼를 만든다. 단결정과 다결정의 차이를 표 1에 비교하였다. 웨이퍼 위에 pn 접합과 전극을 형성하면 태양전지가 만들어진다. p형 단결정 실리콘 웨이퍼 위에 인 등 확산 물질을 뿌려 n형 반도체를 만들어 pn 접합을 형성한 후 내부의 전 전류가 밖으로 흐를 수 있도록 상, 하부 전극을 형성하고 빛의 반사율을 줄이기 위해 반사방지막을 입힌다. 태양전지 하나가 출력할 수 있는 전력의 양은 제한적이기 때문에 일반적으로 태양전지를 수십~수백 개를 합친 모듈이 제조된다. 여러 개의 모듈은 다시 하나의 어

표 1. 단결정 실리콘과 다결정 실리콘의 비교.

| 구분                | 단결정 실리콘                 | 다결정 실리콘   |
|-------------------|-------------------------|-----------|
| 순도                | 높다                      | 낮다        |
| 결정결합밀도            | 낮다                      | 비교적 낮다    |
| 효율                | 높다                      | 비교적 낮다    |
| 획득 효율의 도달한계치 (예상) | 28%                     | 21%       |
| 제조방법              | 초코랄스키법 (CZ), 플로팅존법 (FZ) | 캐스트법, 리본법 |
| 원가                | 고가                      | 비교적 저렴    |

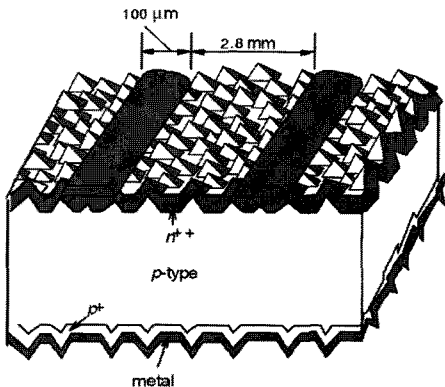


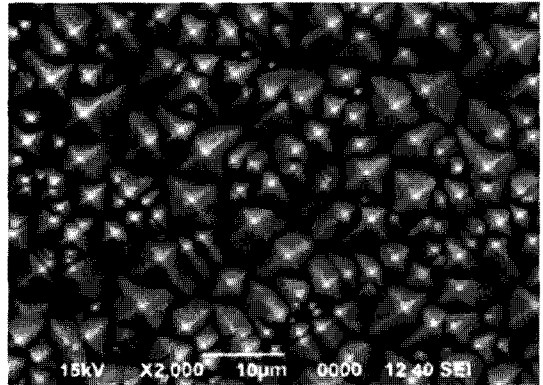
그림 4. 상업용 스크린 프린팅 (SP) 태양전지의 기본 구조.

레이 패널로 합쳐지고 여러 패널이 합쳐져 태양광 발전 시스템이 완성된다.

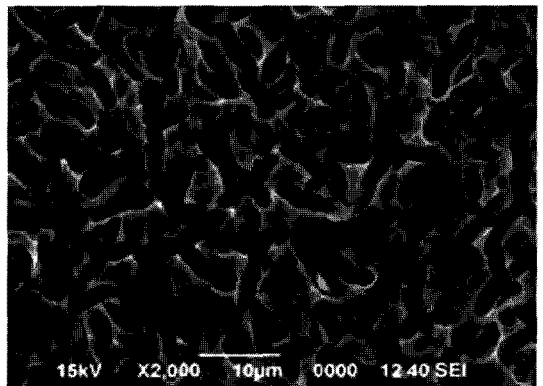
그림 4에 일반적인 실리콘 태양전지의 구조를 나타내었다. 태양전지 제조공정은 텍스처링, p-n 접합형성, 반사방지막, 전극형성, Isolation으로 이루어진다.

## 2.1 텍스처링 (Texturing)

결정질 실리콘 태양전지는 실리콘 잉곳을 200 μm 내외의 두께로 절단 (Sawing)하여 사용한다. Sawing 시 Damage가 발생하게 되고, 표면이 오염되게 된다. 최근에 표면 오염은 세정되어서 웨이퍼가 공급되고 있다. 텍스처링 공정은 이러한 오염물질과 Saw



(a)



(b)

그림 5. 벌크 실리콘 태양전지의 텍스처링 공정 (a) 단결정, (b) 다결정.

damage를 제거하는 동시에 표면을 등방성 혹은 이방성으로 식각하여 반사율을 감소시키는 역할을 한다. 반사율을 감소함으로써 태양전지 내에서 빛의 통과 길이가 길어지고 후면으로부터의 내부반사를 이용하여 흡수된 빛의 양이 증가되게 된다. 단결정 실리콘의 경우, 표면손상제거 (Saw damage removal ; SDR)는 Pre cleaning 과정과 NaOH나 KOH를 이용하여 주로 진행한다. 텍스처링은 TMAH, KOH, NaOH의 알칼리에 IPA, DI water (DIW)를 혼합한 습식방법으로 진행되어, 3~10 um 크기의 피라미드가 형성되고 10% 전후의 반사율을 나타낸다 [3]. 다결정 실리콘 웨이퍼의 경우, 일반적으로 산용액인 HF:HNO<sub>3</sub>를 이용하여 텍스처링한다. 그림 5는 단결정과 다결정 웨이퍼의 텍스처링 이미지이다.

## 2.2 p-n junction

pn 접합 형성은 PoCl<sub>3</sub> 확산로에서 Pre-deposition 과 Drive-in공정으로 구성되고, 약 800~900도에서 확산막으로 n층이 형성된다. 또는 인산을 스프레이로 도포한 후 열처리하여 형성한다. 도핑은 불순물 농도 조절과 표면의 Dopant의 분포제어가 중요하다. 확산 후 도포막인 PSG (Phosphosilicate glass) 산화막을 HF로 제거한다. 면저항은 일반적으로 50~80 옴이 사용된다.

## 2.3 반사방지막 (Anti-reflection coating, ARC)

반사방지막은 상층에서 반사된 빛과 하층에서 반사된 빛이 서로 소멸간섭을 일으키도록 함으로써 표면에서의 빛 반사를 줄이고 특정한 파장영역의 선택성을 증가시키기 위해 사용된다. 즉, 실리콘과 공기와의 중간 굴절률을 가진 투명한 막을 태양전지 표면에 형성하고 빛의 간섭효과를 이용하여 반사를 억제하는 것이다. 이상적인 반사방지막의 두께와 굴절률은 반사파가 소멸 간섭을 일으키도록 다음의 식을 만족해야한다 [3].

$$nd = \lambda/4, n = n_{si}$$

여기서 d는 막의 두께, λ는 태양광의 중심 파장, n

은 ARC의 굴절률, n<sub>si</sub>는 Si기판의 굴절률이다. SP태양전지의 반사방지막은 1.9~2.1 사이의 굴절률과 70~85 nm 두께의 SiN<sub>x</sub>:H막이 PECVD법으로 주로 형성된다. PECVD SiN<sub>x</sub>:H막은 주로 SiH<sub>4</sub>과 NH<sub>3</sub>를 이용하여 300~400도 사이에서 증착되고 수소의 패시베이션 효과와 막의 품질을 향상시키기 위해 In-situ anneal을 30분 이내에서 진행하기도 한다.

## 2.4 전극 (Metal electrode)

생성된 전자, 정공이 전기가 통할 수 있도록 전면 전극과 후면전극을 형성한다. 은 등의 물질을 일정한 모양으로 패터닝 마스크를 이용하여 스크린 인쇄나 진공 증착법으로 전극을 형성한다. 초기에는 진공증착법이 이용되어 왔지만 양산화와 저비용화에 대응하기 위해 현재는 스크린인쇄법이 널리 이용되고 있다. 수광면은 Ag 페이스트로 빛의 투과를 위해 일부 분만 형성하여 Drying하고, 후면전극은 Al 페이스트로 전체에 걸쳐 형성시켜 drying한다. Ag-Al busbar를 인쇄하고 750~850도 사이의 연속 소성로를 이용하여 Co-firing한다. Al은 후면에 형성된 n층을 p+ 전계층 (Back surface field, BSF)을 형성하게 하여 전자가 이동하여 재결합하는 것을 막아 누설전류를 줄이고 접촉저항 등을 개선시킨다. BSF층은 프린팅 및 소성 (Firing) 조건을 최적화하여 BSF 두께를 최적화하는 것이 중요하다. BSF 두께가 너무 얇으면 후면전계가 잘 형성되지 않고, 너무 두꺼우면 웨이퍼 휨 (Bowing)을 일으키는 원인이 된다. 전면 전극 형성시 고려해야 할 사항은 전극의 설계 및 소성 온도와 시간이다. 전극형성기술에서 전극에 요구되는 것은 저접촉저항, 고도전율, 양호한 땀납성이다.

## 2.5 Edge isolation

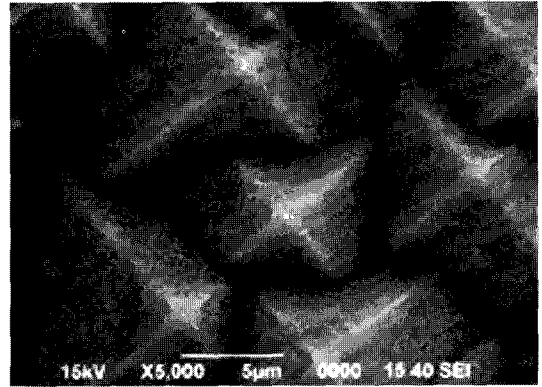
태양전지에서 사용되는 확산 공정은 전면과 후면에 동시에 도핑 되어있다. 이를 전기적으로 누설을 방지하기위하여 Isolation을 레이저를 이용하여 진행한다. IR 레이저가 주로 이용되었으나 Green과 UV 레이저를 이용하기도 한다. Isolation은 ARC 공정 전에 건식 방법으로 웨이퍼의 Edge부를 플라즈마 에칭하여 진행하는 방법과 웨이퍼를 식각용액에 후면을 단면 에칭하는 방식으로 진행하기도 한다.

### 3. 결정질 실리콘 태양전지 연구 및 기술 개발 동향

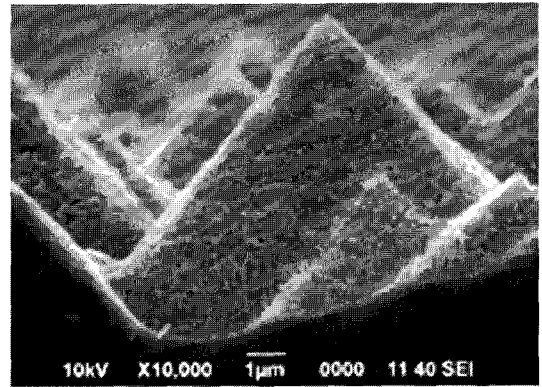
벌크 실리콘 태양전지의 연구 개발 동향은 효율 향상에 중점을 두고 있다. 본 절에서는 고효율화 공정 및 기술에 대하여 소개한다.

텍스처링 공정에서는 나노 구조를 이용한 저반사 공정들이 연구되고 있다. 대표적인 것이 나노와이어 기술이나 잉크젯 프린터를 이용한 패터닝, 그리고 스탬프를 이용한 기술 등의 방법이 시도되고 있다 [4-7]. 스탬프를 이용한 임프린트 기술과 잉크젯 기술은 텍스처링 공정에 적용하여 Inverted pyramid 형태의 패턴을 구현하여, 최저 반사율과 빛의 최대 경로를 구현하고자 연구 중에 있다 [8]. 나노와이어 기술을 이용한 방법은 진공증착법을 이용한 패터닝과 Metal-assisted etching을 사용하여 나노 구조를 형성할 수 있다. 진공 증착은 나노 돔같은 형태를 구현하는데 반하여, 갈바닉 공정을 이용한 Metal-assisted etching은 습식공정으로 Wet station에서 진행할 수 있으며, 금속원소의 회수 처리공정을 통해 재활용할 수 있다. 그림 6은 본 연구진이 기존의 피라미드 텍스처링 공정에 나노와이어 공정을 결합하여 연꽃잎의 돌기 모양으로 구현하였다. 이를 나노 텍스처링 공정으로 명명하였다. 이 공정을 통하여 300~1,100 nm의 평균 반사율을 3% 이하까지 낮출 수 있다 [5]. 다결정 실리콘 태양전지의 경우, 산용액을 이용한 텍스처링 시 20% 전후의 반사율 보여주지만, Reactive ion etching (RIE)를 이용하면 표면에 나노 돌기구조들이 형성되어 반사율을 10%까지 감소시킬 수 있다. RIE를 이용한 다결정 태양전지의 경우 17~18%대의 셀효율을 나타내고 있다.

p-n접합의 공정에서는 주로 선택적 에미터 (Selective emitter, SE)라는 선택적 도핑이 많이 연구되고 있다. 태양전지에 입사된 광에 의하여 발생된 전자들은 pn 접합부에 형성된 내부전기장에 의해 양쪽의 전극으로 이동하게 되는데, 이때 전하인 전자와 정공들이 내부에서 재결합 없이 전극으로 쉽게 도달할 수 있도록 전극 접촉부위만 상대적으로 고농도의 에미터를 형성하여 전위계단을 만들어 주는 것을 SE



(a)



(b)

그림 6. 나노텍스처링 공정을 이용한 피라미드 표면의 Lotus surface 구현.

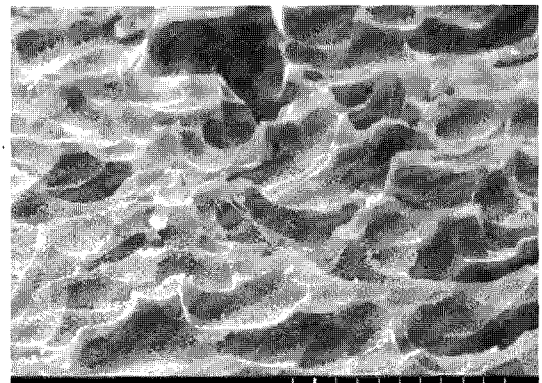


그림 7. RIE를 이용한 다결정 실리콘 텍스처링 공정.

라고 한다. SE는 기존 양산라인에 최소한 투자로 효율을 향상시킬 수 있기 때문에 많은 태양전지 업체들이 이 기술을 양산공정에 적용하고 있다. 선택적 에미터 공정 방식은 다양한 방식의 열에너지를 적용하여 확산 공정을 기본으로 진행되고, 여기에 식각이나 추가 도핑하는 방식 등으로 수행된다. 주로 레이저를 이용한 방식이 진행되고 있고, 다른 형태로는 Innovalight社가 개발한 실리콘 잉크를 이용한 방법이 있다 [9]. 에미터를 선택적으로 형성시키면 직렬 저항을 감소시켜서 전하 수집 능력을 향상시켜 0.2~0.8% 정도의 효율 향상이 이루어질 수 있다 [10].

반사방지막 공정에서는 이중반사방지막이 연구되고 있다. 가장 일반적인 것은 PECVD를 이용하여 저온에서 SiO<sub>2</sub>층과 SiN<sub>x</sub>을 적층하여 반사율을 낮춘다 [11]. 텍스처링 기술의 발전으로 인하여, 이중 반사방지막의 반사율 감소분이 효율향상의 기여가 크지 않다. 따라서 ARC 측면보다는 표면 패시베이션 공정이 중요시 되고 있다. 더욱이, 웨이퍼의 두께가 200 um 이하의 박형으로 표면 효과가 증대되고 있어 패시베이션 공정은 매우 중요하게 되었다. 고품위로 형성된 SiO<sub>2</sub>층과 SiN<sub>x</sub> ARC층의 결합 형태 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN<sub>x</sub>층이 연구되어 지고 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 Surface state density가 우수하고 Negative fixed charge (~10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>)특성을 가지고 있어 이로 인해 Field effect 패시베이션이 가능하다 [11]. 이런 특성으로 소수캐리어들의 전하수명 (Lifetime)이 SiN<sub>x</sub> 단일막보다 2배 이상이 향상된다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 PECVD법과 원자층 증착법 (Atomic layer deposition, ALD)으로 성장되고 있다. 특히, ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>막은 적절한 표

면처리와 열처리 과정을 통하여 1 ms 전후의 Lifetime도 달성된다 [13]. ALD 기술은 반도체의 절연막 증착에 사용되던 기술을 이용하여 연구되어져와 양산성이 큰 걸림돌이었다. 그러나 최근에 인라인 형태와 배치형태의 ALD가 개발되어 시간당 2400매의 증착이 가능하다. 다른 방법으로는 일반적인 SP 구조와는 다르지만 비정질실리콘 (a-Si)을 5 nm 증착하여 패시베이션하는 형태인 이중접합 태양전지 (HIT)도 연구 중에 있으며 산요사가 생산하고 있다 [14]. a-Si을 이용한 패시베이션 a-Si의 증착막 특성도 중요하지만 세정을 통한 표면처리도 매우 중요하다. HIT셀은 Cluster PECVD를 통하여 실리콘 웨이퍼에 P/I/N층을 증착하여야 하기 때문에 초기 장비 투자

|    | Conventional   | Selective emitter   |
|----|--|---|
| 구조 |  |   |
| 특징 | <ul style="list-style-type: none"> <li>homogeneous emitter (50 ~ 80 Ω/□)</li> <li>emitter 재결합 손실 증가</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>shallow emitter (n<sup>+</sup>, 100~150 Ω/□)</li> <li>emitter 재결합 손실 감소</li> <li>단파장 응답특성(양자효율) 증가</li> <li>heavy emitter (n<sup>+</sup>, 30~50 Ω/□)</li> <li>접속저항 감소</li> </ul> |

그림 8. Selective emitter의 면저항과 특성.

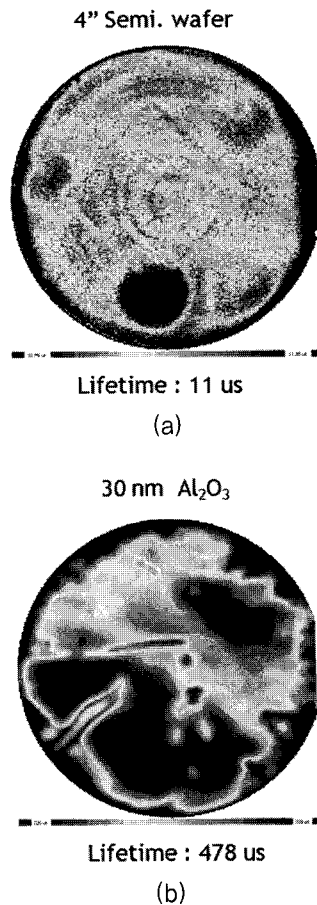


그림 9. ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>막 증착을 이용한 전하수명 향상.

비와 제조단가가 높다는 단점이 있다.

전극 공정에서 전면 전극과 후면 전극으로의 나누어 살펴보면, 우선, 전면 전극의 Shadowing loss를 줄이는 것이 요구되고 있다. 전면전극의 Shadowing loss에 광학적 손실은 약 7~8%에 달하여, 전면 전극의 미세화와 저항 개선을 위한 높은 Aspect ratio (AR)에 대한 방법들을 연구하고 있다. 이런 방법들은 인쇄방식의 개선이나 스크린인쇄방식을 바꾸는 형태로 off-set 인쇄, 도금 (Plating), 디스펜싱, Laser transfer, Color filter 등이 연구되고 있다. 스크린인쇄 전극은 비용면에서 큰 이점을 가지고 있지만 비교적 접촉저항이 높고, 포러스 (Porous)이기 때문에 도전율이 낮은 점, 소성시의 온도 영향성, 전극강도가 비교적 약한 점 등의 불리한 점이 있다. 인쇄소성 전극의 경우, 글라스프리트와 소성온도가 중요한 역할을 하고 있다. 이 프리트에 의해 오믹접합이나 전극강도가 정해진다. 표면전극 폭은 250  $\mu\text{m}$  정도에서 100  $\mu\text{m}$ ~80  $\mu\text{m}$ 으로 미세화되었다. 요즘에는 50  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 전극형성법이 검토되고 있다. 또, 미세화와 동시에 후막으로 하지 않으면 안되며 스크린, 페이스트나 새로운 전극형성방법의 개발이 필요하게 된다. 스크린에 대해서는 큰 개구율을 얻기 위해서 고품질의 스텐레스 메쉬나 새로운 메쉬 재료 등이 검토되고 있다. 소성은 분위기로서 적외선방법으로 진행되어 급격한 열상승으로 짧은 피크온도유지시간이 가능하여 고온 단시간으로 양호한 오믹접합과 전극강도를 얻을 수 있다. 그러나 페이스트에 맞춘 온도프로파일이 필요하므로 그 범위는 좁다. 고효율화를 위해서는 빠른 온도 증감속도와 페이스

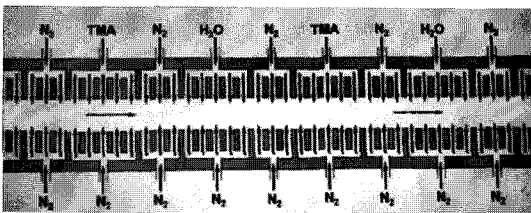
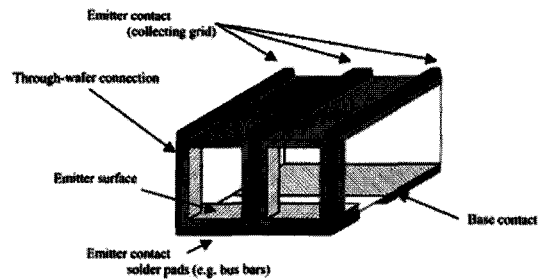


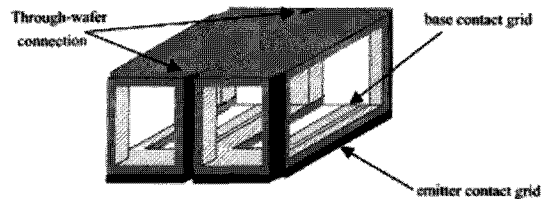
그림 10. in-line형태의 ALD  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 막 증착 시스템 (Levitrack社).

트의 개발이 필요하다. 도금 기술은 Ag의 Light induce plating (LIP)방식과 Cu/Ni 도금이 있으며 이들의 생산성 향상을 위해 노력중이다. 기판의 두께 감소로 비접촉식 형태의 프린팅기술과 디스펜서에 의해 페이스트를 직접 기판에 전극을 형성하는 방법 등도 검토되고 있다.

가장 좋은 방법은 수광면인 전면부 전극을 없애고 후면전극형이 궁극적인 방향이다. 그러나 후면전극 구현에서의 공정 및 비용이 큰 장벽으로 작용하고 있다. 썬파워社에서는 오랫동안의 공정 경험과 양산 기술 축적으로 n형 실리콘 기반의 후면 전극 태양전지 (Interdigitated back contact, IBC)를 양산하고 있으며, 최근 24%의 효율을 달성하였다 [15]. 후면전극형태의 다른 방법의 접근 방법이 전면 전극을 뒤로 돌려서 형성하는 Emitter wrap-through (EWT)나 Metal wrap-through (MWT)가 연구되고 있으나 관련 공정기술과 Laser drilling의 기술 향상이 필요하다 [15-17].



(a)



(b)

그림 11. (a) MWT와 (b) EWT 구조.



후면 전극에서는 Back surface reflector (BSR), Back surface field (BSF), Back surface recombination velocity (BSRV)조절이 중요하다. 절연막을 이용한 후면 패시베이션, Local BSF, Point contact의 조합을 통하여 최소 1~2% 이상의 효율을 향상 시킬 수 있을 것으로 예측된다.

최근에 전극의 소성 공정 후 Post metallization anneal (PMA)를 3~7% 수소의 Forming gas anneal (FGA)과 고압의 수소 열처리를 이용하여 수소 패시베이션 연구들도 진행 중에 있다 [18].

결정질 실리콘을 기반으로 한 태양전지 효율 향상에 대한 연도별 진척도를 그림 11에 표현하였다. 현재 결정질 실리콘 태양전지의 R&D 최고 효율은 PERL (Passivated emitter, rear locally-diffused) 태양전지로, 반도체 기판과 반도체 공정기술을 망라하여 소면적 기준으로 25%를 기록하고 있다. 초고효율을 나타낸 PERL 태양전지는 호주의 New South Wales대학에 의하여 개발된 것으로서 공정이 30단계 이상이고 고난도, 고가의 장비와 고비용 제조공정을 사용하고 있어 양산에 적용하기에는 어려운 실정이다. 그러나 이러한 개념을 바탕으로 양산 가능한 기술을 추출하여서, 태양전지 공정 기술로의 적용들이 진행 중에 있다. 앞에서 언급된 HIT, IBC 셀과 함몰전극 (Buried contact), Laser fired contact (LFC) 태양전지 등도 18~24%의 높은 광변환 효율을 갖는다.

전체적으로 개발 동향을 요약하자면, 고효율 태

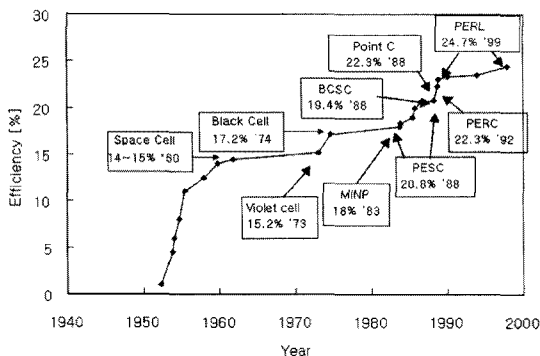


그림 12. 연도에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 효율 발전.

양전지의 주요 특성은 표면에서의 재결합을 방지하기 위한 Passivation, 빛 흡수를 최대화, 전면 전극의 면적을 최소화, 전하 흐름의 전체의 형성, 전극과 실리콘 기판과의 접촉 저항을 최소화하는 것이다. 또한, 이러한 고효율 공정을 적용할 수 있는 장비의 개발이 필수적으로 이루어져야 한다.

지난 몇 년간 SP구조의 태양전지의 셀효율은 1년에 0.5% 정도의 효율이 향상되어 왔으나, 20% 효율 이후에는 효율 향상이 매우 느려질 것으로 예측되고, 이를 위해서는 구조의 변화가 수반되어야 할 것이다. 또한, 기판 특성이 우수한 n형 실리콘 기반의 태양전지 기술개발이 동반되어야 21% 이상의 고효율이 보다 용이하게 달성될 것 판단된다.

#### 4. 국내 실리콘 태양전지 연구 기관 및 전망

국내에 결정질 실리콘 태양전지 업체가 몇 년 사이에 대폭 증가 및 증설을 통해 빠른 성장 중이지만, 이를 뒷받침할 연구 기관이 부족한 편이다. 대학교에서 성균관대학교, 고려대학교, 세종대학교 등이 연구 중이며, 연구소는 한국에너지기술연구원 (KIER), 한국세라믹기술원 (KICET)에서 태양전지 공정에 대하여 연구 중이다. R&D 파일럿 라인 형태로 전체 공정을 156 mm 기판 크기로 진행 할 수 있는 곳은 KIER, KICET, 성균관대학교 정도이고, 17% 이상의 셀효율을 확보하고 있다. 본 연구진이 속한 KICET에서는 국산 장비와 소재를 이용하여 18% 이상의 공정을 확보하는 연구를 진행 중에 있으며 고효율 공정 장비와 관련 소재들을 개발하고 있다.

실리콘의 산업과 기반기술은 실리콘원소의 풍부함을 바탕으로, 생각 이상의 대단한 생명력을 가지고 있어 실리콘 산업은 계속 번창하고 있다. 실리콘 반도체는 30여 년 전부터 향후에 종결된다는 예측을 계속 해왔으나 꾸준한 성장과 함께 계속 진행되어 왔다. 그럼으로, 실리콘 태양전지 산업은 지속적으로 성장할 것이며, 투명하고 유연한 초박형 태양전지 형태 등의 여러 구조 형태로 발전될 것으로 예상된다. 실리콘 태양전지는 반도체디스플레이기술처



럼 다수의 참여가 기술 혁신을 가져와 결국에는 융합된 태양전지의 발전 시대를 맞이할 것이다. 이를 위하여 국내 연구기관의 부족한 연구 인력의 유기적인 체계와 다양한 분야의 연구 인력의 참여가 필수적일 것이다.

## 참고 문헌

- [1] EPIA, 2010년
- [2] 디지털타임스, 2011.01.10.
- [3] E. Vazsonyi, K. De Clercq, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K. Said, J. Poortmans, J. Szlufcik, J. Nijs, Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells" Sol. Energy Mater. Sol. Cells 57, 179 (1999).
- [4] K. Peng, J. Hu, Y. Yan, Y. Wu, H. Fang, Y. Xu, S.T. Lee, and J. Zhu, "Fabrication of single-crystalline silicon nanowires by scratching a silicon surface with catalytic metal particles" Adv. Func. Mater. 16, 387 (2006).
- [5] H.S.Chang and H. Jung, "Nearly zero reflectance of nano-pyramids and dual-antireflection coating structure for monocrystalline silicon solar cells" J. Nanosci. and Nanotech. (accepted).
- [6] [http://willson.cm.utexas.edu/Research/Sub\\_Files/SFIL/](http://willson.cm.utexas.edu/Research/Sub_Files/SFIL/)
- [7] D. Y. Khang and H. H. Lee, "Wafer-scale sub-micron lithography" Appl. Phys. Lett. 75, 2599 (1999).
- [8] 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. Photovolt: Res. Appl. 7, 471 (1999).
- [9] H. Antoniadis, "Silicon ink high efficiency solar cells" 34th PVSC, Philadelphia, 2009.
- [10] M.M. Hilali, A. Rohatgi, and B. To, "A review and understanding of screen-printed contacts and selective-emitter formation" 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules (NREL conference paper), Colorado, 2004.
- [11] B. Kumar, T.B. Pandian, E. Sreekiran, S. Narayanan, "Benefit of dual layer silicon nitride anti-reflection coating" Proc. 31st IEEE PVSC, Orlando, USA 2005.
- [12] B. Hoex, J. Schmidt, P. Pohl, M. C. M. van de Sanden, and W. M. M. Kessels, "Silicon surface passivation by atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>" J. Appl. Phys. 104, 044903 (2008).
- [13] H.S. Chang, H. Lee, H. Jung, B. Kim, H. Park and W.C.Shin, "Effective surface passivation of crystalline silicon by mass-product ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>" 26th EUPVSEC (submitted).
- [14] Y. Tsunomura, Y. Yoshimine, M. Taguchi, T. Baba, T. Kinoshita, H. Kanno, H. Sakata, E. Maruyama, M. Tanaka, "Twenty-two percent efficiency HIT solar cell" Sol. Energy Mater. Sol. Cells 93, 670 (2009).
- [15] E. V. Kerschaver, and G. Beaucarne, "Back-contact solar cells: A review" Prog. Photovolt: Res. Appl. 14, 107 (2006).
- [16] J. M. Gee, P. Kumar, J. Howarth, T. Schroeder, J. Franklin, J. Dominguez, and D.Tanner, "Development of industrial high-efficiency back-contact Czochralski-silicon solar cells" 25th EUPVSEC, Valencia, 1342 (2010).
- [17] I. Romijn, M. Lamers, A. Stassen, A. Mewe, M. Koppes, E. Kossen and A. Weeber, "A new industrial MWT cell technology enabling high efficiencies on thin and large MC-SI wafers" 22nd EUPVSEC, Milan, 1043 (2007).
- [18] H.S. Chang, 'Improvement in Conversion efficiency of multi-crystalline silicon solar cells using efficient hydrogen treatment' Electrochem. Solid-State Lett. 13 B237-B239 (2010)

## 저자|약력|



성명 : 장효식

◆ 학력

- 2000년 광주과학기술원 신소재공학과 공학석사
- 2004년 광주과학기술원 신소재공학과 공학박사

◆ 경력

- 1998년 - 2004년 한국표준과학연구원 나노표면그룹 연구원
- 2004년 - 2007년 하이닉스반도체 메모리연구소 소재개발팀
- 2007년 - 현재 한국세라믹기술원 이천분원 엔지니어링세라믹센터 태양전지실 선임연구원