

# 결정계 Poly-Si/Wafer 및 CIGS 태양전지 기술동향

2010.12.10

삼성전자 LCD 사업부  
광에너지사업팀 박성찬 수석





**I Introduction**

**II 결정계 태양전지(Poly-Si/Wafer)**

**III 결정계 태양전지(고효율화)**

**IV CIGS 태양전지**

■ 신·재생에너지 (New · Renewable Energy) : 화석 연료나 핵분열이 아닌 대체 에너지의 일부로 신 에너지와 재생 에너지를 통틀어 부르는 말

- 신에너지(New E.) : 새로운 물리력, 새로운 물질을 기반으로 하는 에너지
- 재생에너지(Renewable E.) : 재생가능한 에너지

Bio Fuel



Hydro Power



Solar Cell



Geo Thermal



Wave Power



Wind Power

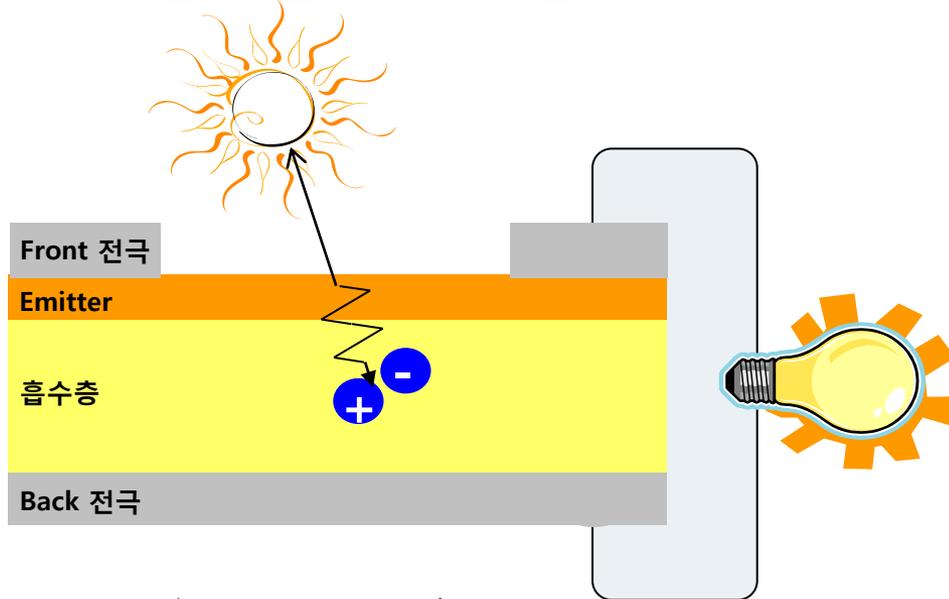


그 밖에 Biomass, Tidal power, Hydrogen Energy, Fuel Cell .....

# 태양전지 구동 원리

- 단결정 및 다결정 기판, p/n Junction, 반사방지막, 상/하부 전극으로 구성됨
- 반도체에 빛을 쬐이면 자유전자 생성 → p-n접합의 전기장의 영향으로 n-형 쪽으로 끌려 넘어가 전극을 통해 외부 부하로 흘러가는 전류를 형성

[ 광전류 발생 Mechanism ]



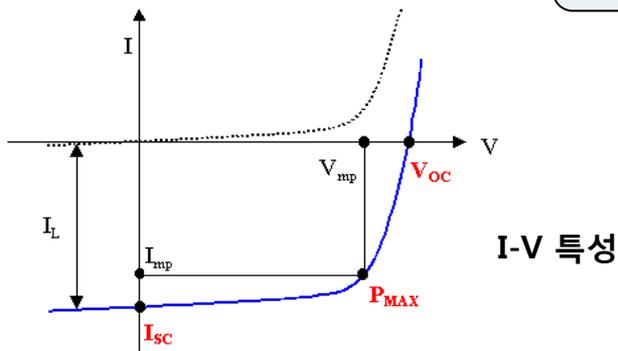
① 태양광 입사

② 흡수 : 태양전지 內 광 흡수

③ 생성 : 전자 / 정공 생성

④ 분리 : 전자 / 정공 전극으로 이동

⑤ 수집 : 전류 생성



변환효율

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{input}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{input}}$$

# 주요 신재생 에너지의 장,단점 비교

종류	장점	단점
<b>태양광</b>	무공해, 무제한 청정에너지원 필요한 장소에서 필요량 발전가능 유지보수가 용이, 무인화 가능 긴 수명(20년 이상)	에너지밀도가 낮아 큰 설치면적 필요 전력생산량이 지역별 일사량에 의존 설치장소가 한정적, 시스템 비용이 고가 초기투자비와 발전단가 높음
<b>태양열</b>	무공해, 무제한 청정에너지원 화석에너지에 비해 지역적 편중이 적음 다양한 적용 및 이용성, 저가의 유지보수비	에너지 밀도가 낮고, 간헐적임 초기 설치비용이 많음 봄, 여름은 일사량 조건이 좋으나 겨울철에는 불리함
<b>풍력</b>	무공해, 무제한 청정에너지원	기상, 지역조건 영향 큼. 초기 설치비가 비싸다. 유지보수 / 소음 / 설치 시 어려움
<b>지열</b>	발전비용이 비교적 저렴하다	적격지가 한정 / 지중상황파악 곤란 우리나라는 적격지가 드물다
<b>바이오매스</b>	풍부한 자원과 큰 파급효과 / 환경 친화적 생산시스템 환경오염의 저감 (온실가스 등) / 생성에너지의 형태가 다양 (연료, 전력, 천연화학물 등)	자원의 산재 (수집, 수송 불편) / 다양한 자원에 따른 이용 기술의 다양성과 개발의 어려움 / <b>과도 이용시 환경 파괴 가능성</b> / 단위 공정의 대규모 설비투자
<b>연료전지</b>	에너지 효율이 높다 공해가 거의 없거나 매우 적다	단위 부피당 수소저장밀도가 낮다. 안전사고 위험. 수소를 만들기 위해 <b>다른 에너지 필요</b>
<b>폐기물</b>	비교적 단기간 내에 상용화 가능 폐기물의 청정 처리 및 자원으로의 재활용 효과	<b>CO2발생 / 사용 후 고열, 쓰레기 발생</b> 한국 신재생에너지 보급비율인 2.4%중에 74.8% 차지 (생색내기용으로 볼 수 있음)



I Introduction

II 결정계 태양전지(Poly-Si)

III 결정계 태양전지(고효율화)

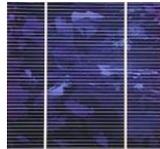
IV CIGS 태양전지

# PV 산업 규모

□ 태양광 산업의 총 부가가치는 연간 \$26.1B, 모듈은 \$11.9B규모

- 결정계 \$20.9B, 박막계 \$5.2B로서 박막계 비중은 약 20%
- 태양전지(모듈) 시장 규모는 결정계 \$9.5B, 박막계 \$2.4B

## [ Si 결정계 Value Chain ]



시장규모 (\$B)

2.0

4.2

6.7

9.5

0.9

15.8

19.0

20.9

비중%

13%

14%

16%

17%

6%

34%

[누적]

[13%]

[27%]

[43%]

[60%]

[66%]

[100%]

업체 수

< 50

< 500

< 100

< 500

< 300

< 1,500

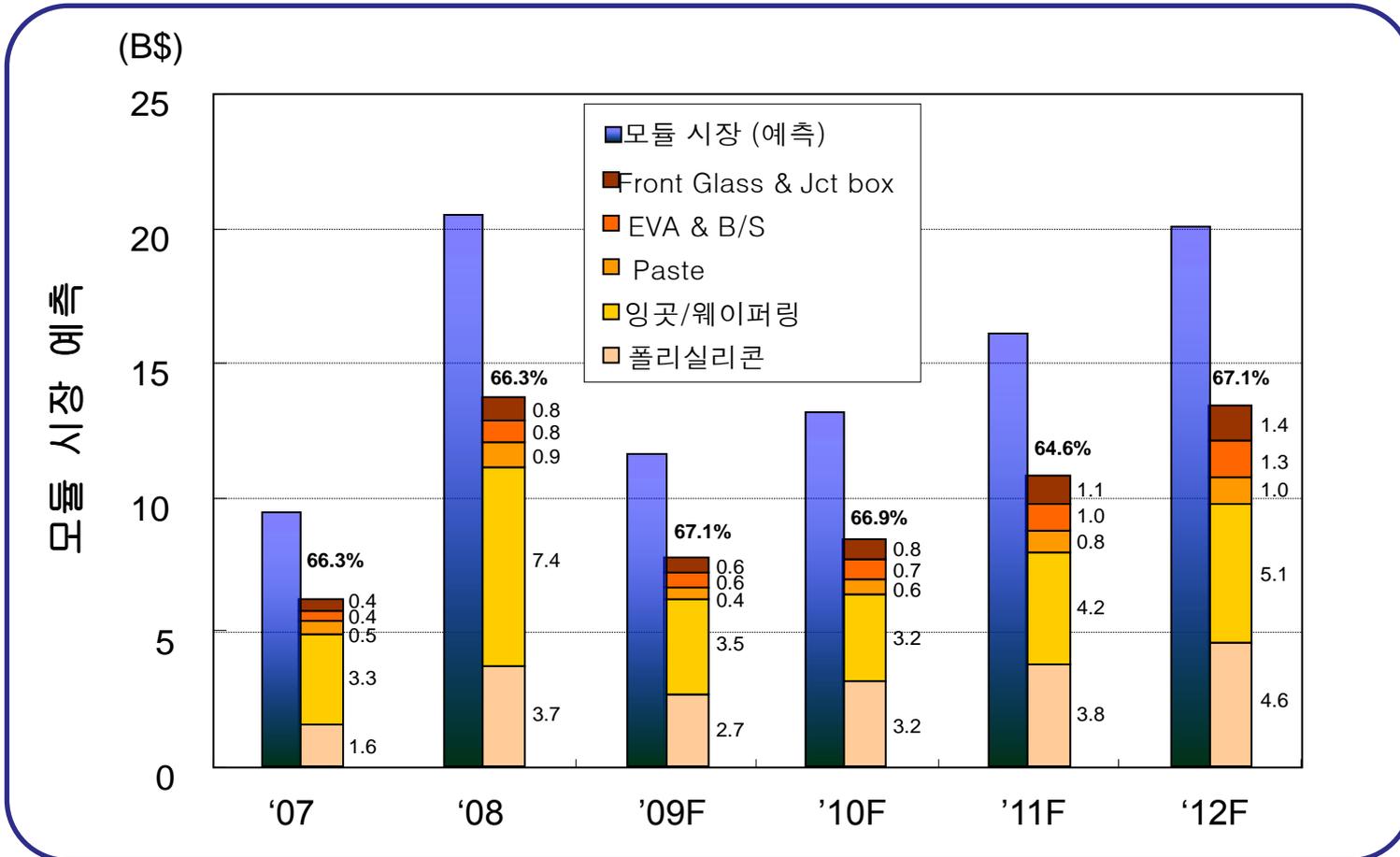
< 3,000 (SI포함)

[ Source: Needham, (2009년 기준, 업계 평균) ]

# 태양전지 재료 시장 전망

□ 보수적 전망 기준으로,

現, 모듈 시장 규모의 65~70%는 소재 시장이며, 지속적인 성장 예상

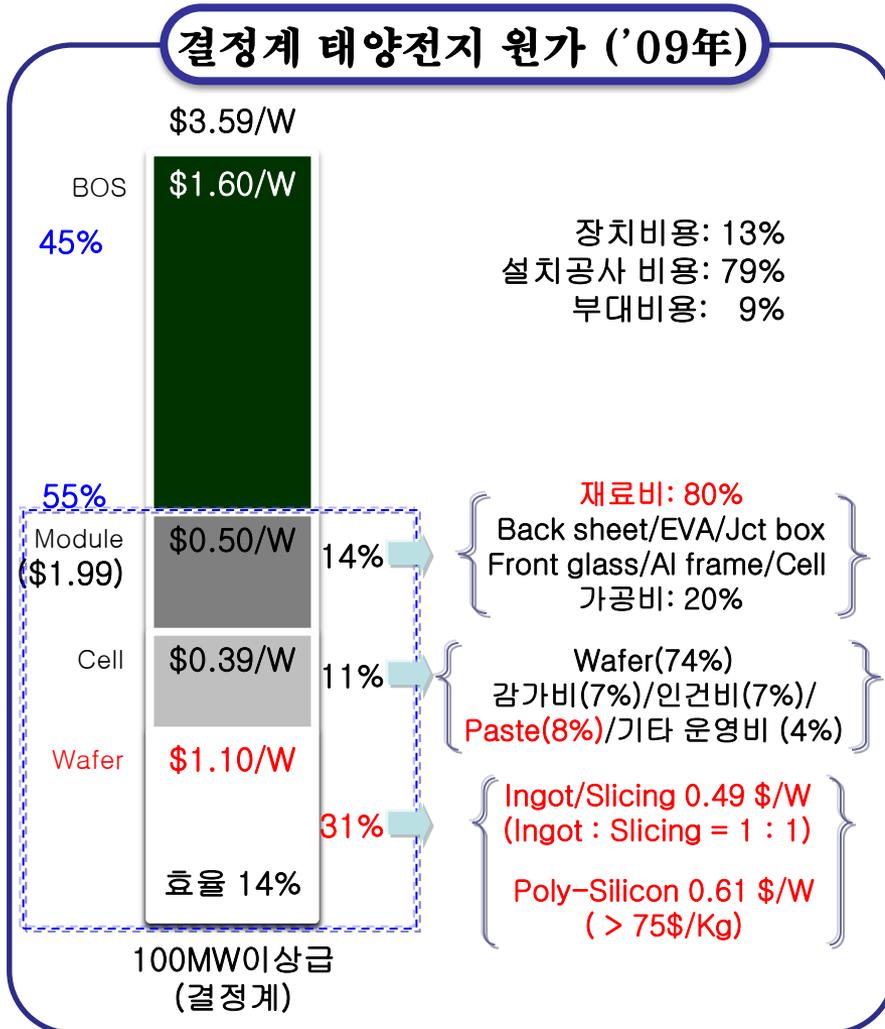


Source: Display bank\_소재 '09/06  
 Display bank\_폴리실리콘 '09/01  
 관계사 (paste)자료

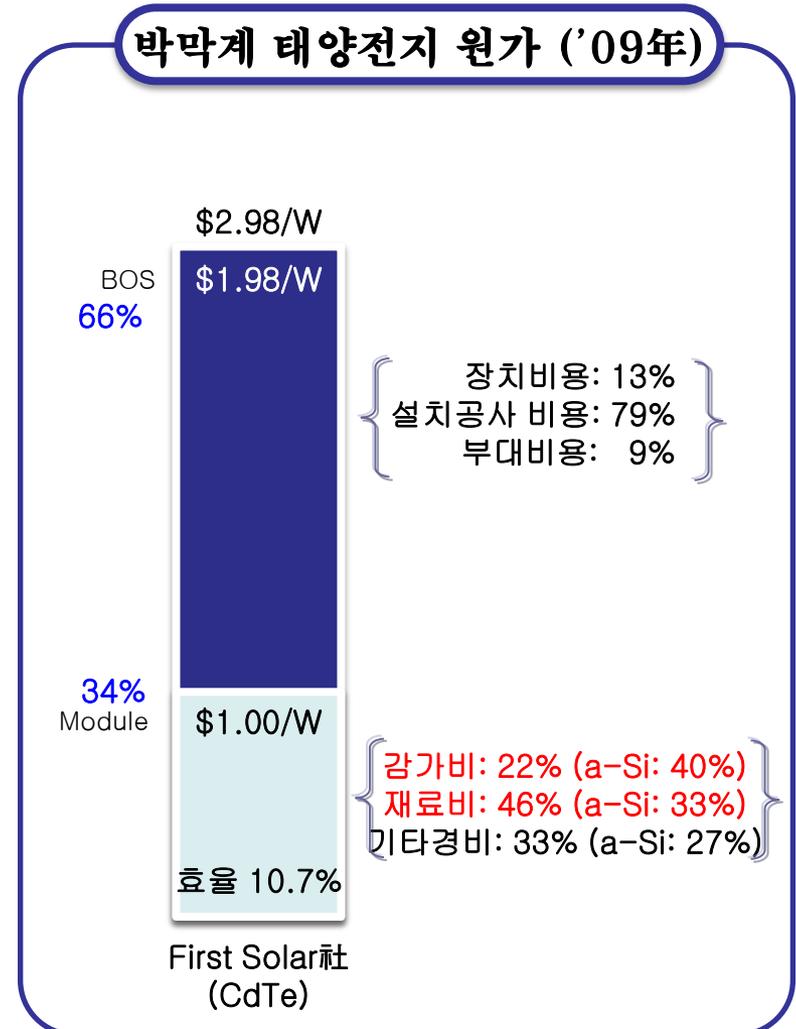
# 태양전지 원가 구조

□ 결정계 태양전지 시스템價의 31%는 Wafer 가격에 기인함.

## 결정계 태양전지 원가 ('09年)



## 박막계 태양전지 원가 ('09年)



# 결정계 태양전지 Supply Chain

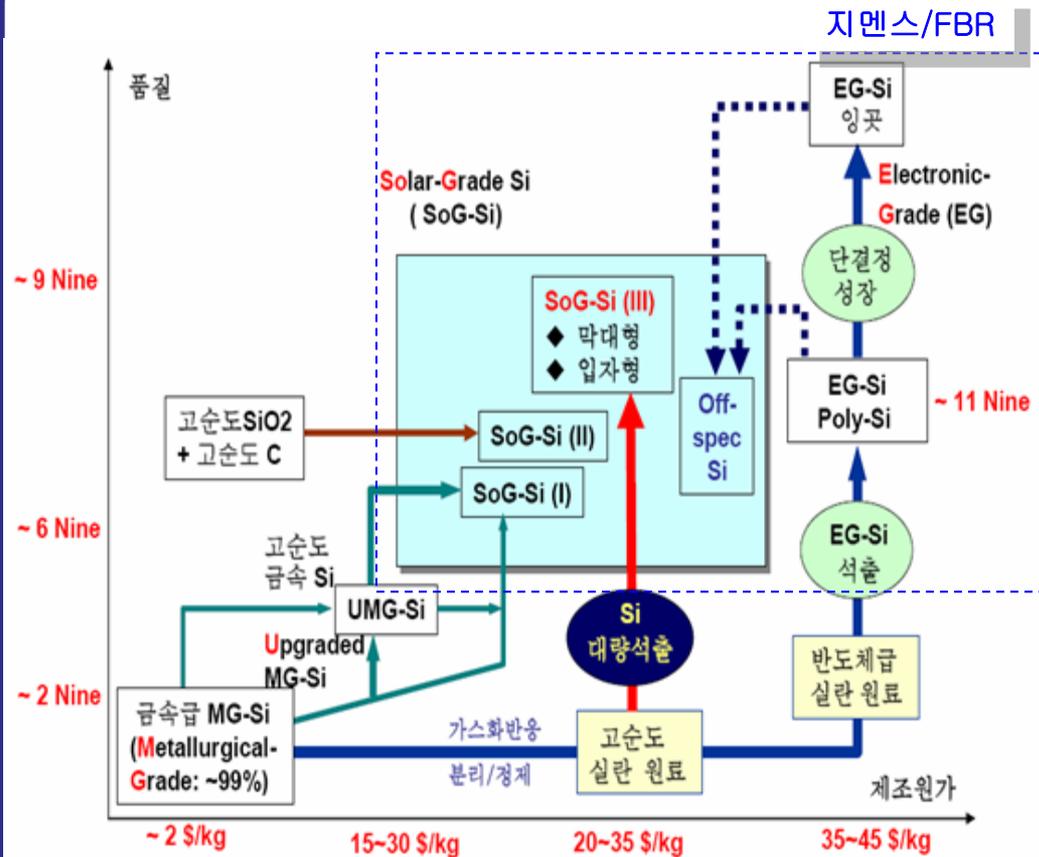
## ■ 폴리실리콘의 수급 불균형 가능성 高

: 전체 supply chain의 수직계열화를 진행중인 업체 多

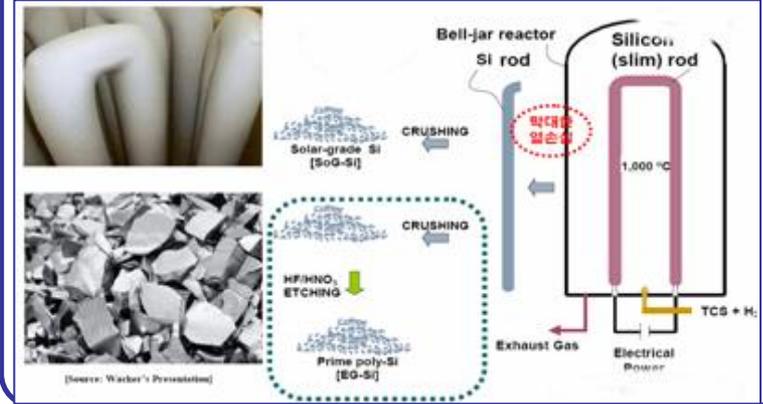


- 고순도 (>9N) 폴리실리콘 제조 공법: 지멘스, 유동층(FBR) 석출 공법  
→ 전력 사용량 감소와 생산성 향상이 주된 issue임.

## 폴리실리콘 순도 vs. 가격



## Siemens Process



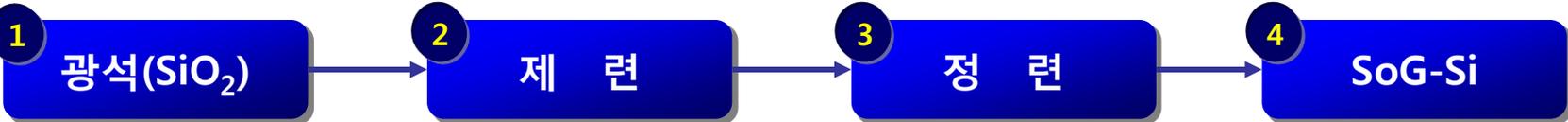
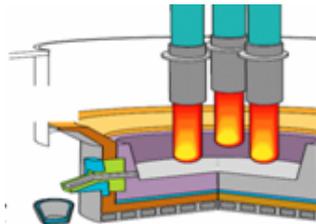
## Fluidized Bed Reactor



# 폴리실리콘 제조 : UMG-Si

- > 6N의 Solar Grade 폴리실리콘 제조원가 감소를 위해 UMG-Si개발
  - 기상 석출이 아닌 MG-Si로부터 고순도화
- UMG Si의 요구 조건: P < 5ppm, B < 1ppm 및 금속 불순물 제거 필수
  - 정련 공정상 Boron, Phosphorus의 제거 어려움

## UMG-Si 제조공정



- 고품위 광산 필요
- B, P 및 금속성분 낮을 것
- 남아공, 북미 등에 분포

- $SiO_2 + C \rightarrow Si + CO$
- Carbon source 중요
- 건식제련(용융제련) 공정

- Si 내 불순물 제거
- Slag 정련 및 방향성 응고
- Leaching 공정

- 태양광급 UMG 실리콘
- B, P 등 불순물 제거
- 금속 불순물 제거

# 기판 제조 기술: 잉곳/Slicing

## □ 대형화에 의한 원가 절감 추구 및 품질 향상 추구

→ 원가 절감: 기판 size 증가, Kerf loss 감소(Ribbon) 및 박형화(sawing), 원재료 절감 (UMG-Si)

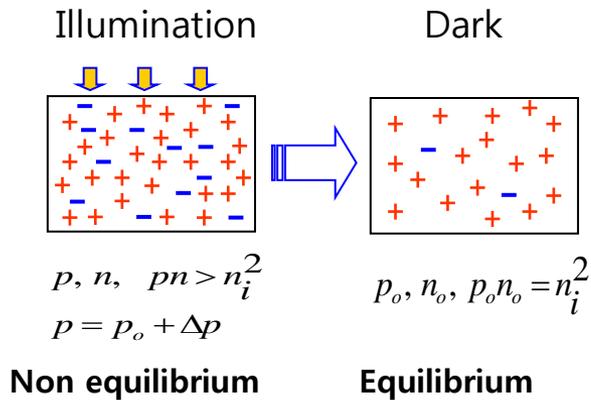
→ 품질 개선: LID 감소 (Ga, M-Cz, High resistivity), 두께 산포 개선, 웨이퍼 표면 평탄도 개선 (sawing)

	단결정	다결정 (HEM)	다결정 (EMC)	다결정 (리본)
기술	 			
특징	품질 高 (5/6inch, P/N)	생산성 高 (6inch, P)	생산성 高 (6inch, P)	원가절감 高 (156 X 80, P)
비고	主流	主流	少數	少數
원료	고순도 p-Si (> 8~9N)	저순도 p-Si (5~6N) (Scrap Poly, 재활용, UMG Si)	저순도 p-Si (5~6N) Granule Poly	고순도 p-Si (> 8~9N) Granule Poly
시장 점유	43.8%	54.5%	3~5%	1.7%
Issue 사항	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lifetime (&gt;100 usec)</li> <li>- P-type기판 LID (Ga-Doped, M-Cz, High Res.)</li> <li>- 기판두께 (breakage/effi.)</li> <li>- 기판형태 사각형화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생산성 향상: 450Kg → 1,000 Kg</li> <li>- 웨이퍼별 산포 (잉곳내 산포) → Lifetime 균일화</li> <li>- 기판 두께 (breakage/effi.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생산성 향상: Pulling방식 도입</li> <li>- 웨이퍼별 산포 → Lifetime 균일화</li> <li>- 기판 두께</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생산성 향상: 1단 -&gt; 4단 성장</li> <li>- 웨이퍼별 산포 → 온도/Gas 제어</li> <li>- 기판 두께</li> </ul>
특이 사항	고순도 p-Si, Pseudo-Square	-	- Puller방식 잉곳성장	- Slicing 없음 (Kerf loss free기술)

# 웨이퍼 품질

- Wafer 품질 : Lifetime, Uniformity
- Wafer 품질에 따른 최적 구조/공정 有

## 웨이퍼 품질이란?



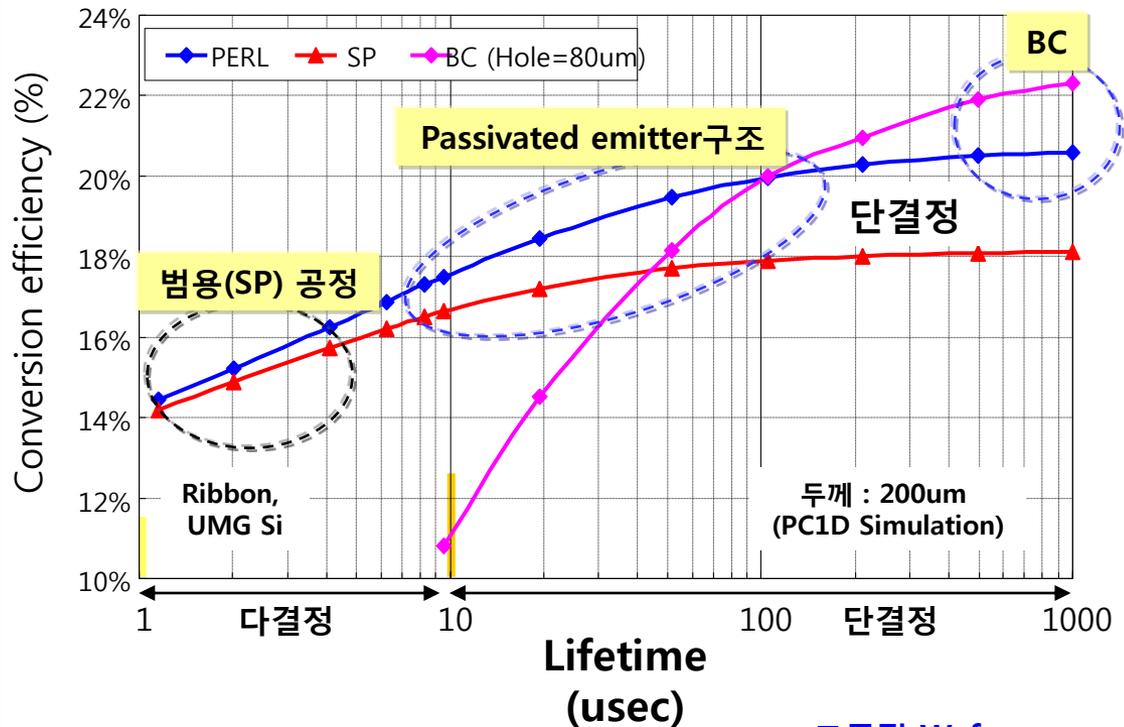
How fast? (electron, hole)

→ lifetime, (diffusivity)

How far?

→ diffusion length

## 웨이퍼 품질別 변환 효율 특성



범용기관  
→ 저가격 구조/공정 유리

고품질 Wafer  
→ 고효율 구조/공정 유리

# 웨이퍼 품질: Lifetime

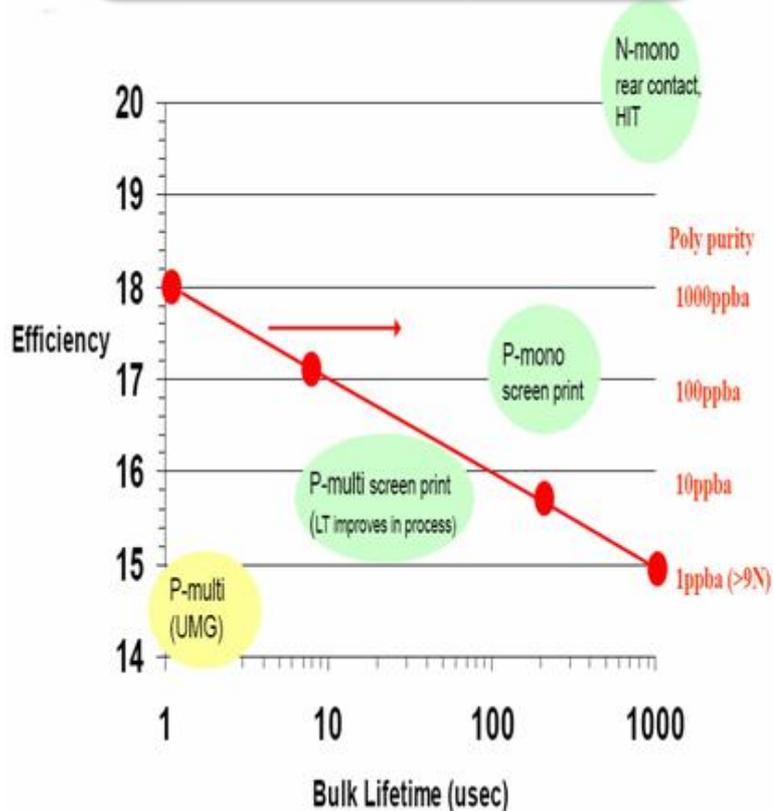
## □ 변환효율과 직접 연관이 있는 품질 핵심 요소는 Lifetime

→ Lifetime에 영향을 주는 인자는 소재(p-Si)부터 웨이퍼 형성 전체 공정에 대한 순도/결함 관리 중요

$$1/\tau_{meas} = 1/\tau_{bulk} + 1/\tau_{surface} + 1/\tau_{auger} + 1/\tau_{rad}$$

P-Si, 잉곳
Slicing
Illumination

### 변환효율 vs. Lifetime (순도)



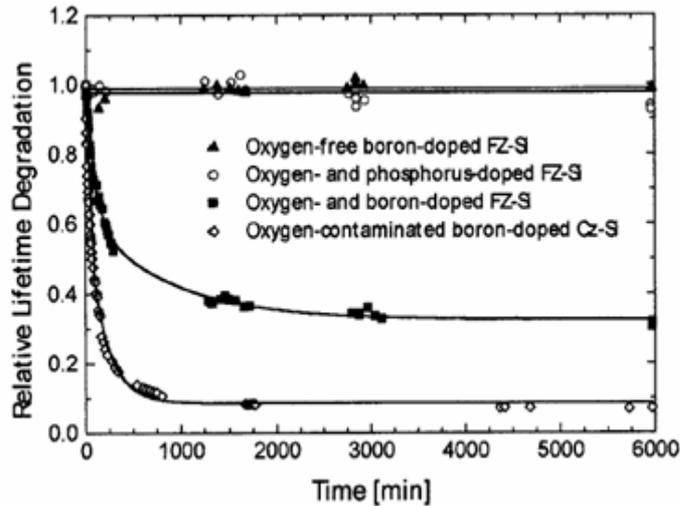
공정 단계	원재료 물성 및 공정 인자	공정 모식도
폴리 실리콘	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 금속 오염 (Fe, Cu, Al, Cr, Ti, Ni, W, Mo)</li> <li>- B, P 순도</li> <li>- 9N 이상 품질 검증 필요 (단결정) 6N 이상 (다결정)</li> </ul>	
잉곳 성장	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Crucible로부터 산소/탄소 농도 제어</li> <li>- 결정성장 결함 (Slip, Disl.)</li> <li>- Dopant 농도 gradient (비저항)</li> <li>- 금속 precipitate</li> <li>- 금속 오염</li> </ul>	
Slicing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wire sawing으로부터 오염 (Cu, Fe, Zn, Al, Mn, etc)</li> <li>- Sawing damage</li> <li>- Saw mark</li> <li>- Slurry에 의한 오염</li> </ul>	

# 웨이퍼 품질: LID

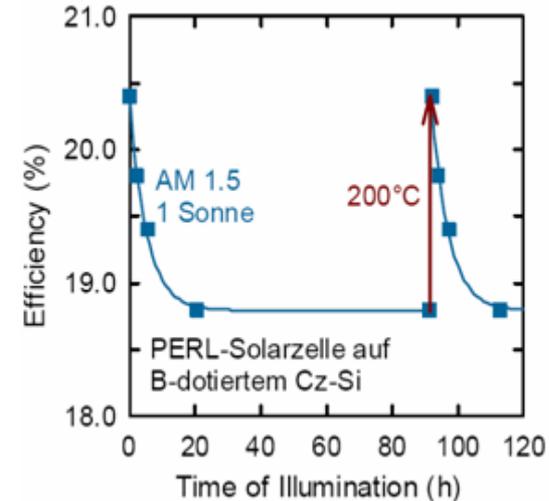
## □ LID 현상은 Boron (P형 기판)과 Oxygen 농도에 의존 (B-O complex형성)

- B-O complex는 e-h pair trap으로 작용하여 광상태하의 lifetime 감소: 단결정 P-type 열화 大
- Lifetime 감소는 효율 저하 유발하며, 200°C 열처리 후 lifetime 복원 (B-O 분해)

### 광상태 lifetime 열화



### 광상태 효율 저하



### 해결책

1. Doping source 변경: Boron에서 Ga으로 변경 (Ga의 편석 계수로부터 수율 drop가능성 있으나, 대량 생산 가능성 大)
2. Boron 농도 감소: Boron이 적은 비저항 3~6 ohm cm 적용
3. Oxygen 농도 감소: Magnetically grown Cz 공법 적용시, Oxygen 농도 8~10 ppma 가능하며 LID 최소화 가능
4. 광상태下에서 후속 열처리 (200°C annealing + illumination, 부가 process) → 효율 복원



I Introduction

II 결정계 태양전지(Poly-Si)

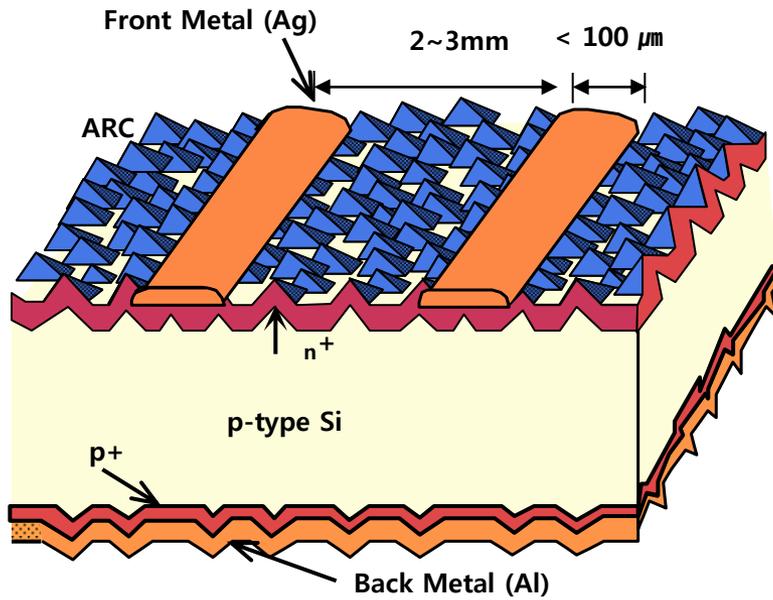
III 결정계 태양전지(고효율화)

IV CIGS 태양전지

- 단결정 및 다결정 기판 사용
- 저가화를 위하여 Screen Printing 전극 공정 적용

## Cell 제조 Process

- ① SDR & Texturing
- ② N+ Diffusion
- ③ PSG Removal
- ④ AR-SiN Depo
- ⑤ Screen Print
- ⑥ Firing
- ⑦ Edge Isolation



## 태양전지 공정기술

- ① Wet 공정
- ② Diffusion 공정
- ③ Wet 공정
- ④ CVD 공정
- ⑤ ⑥ Metallization
- ⑦ LASER 공정

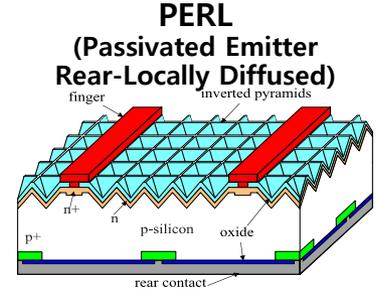
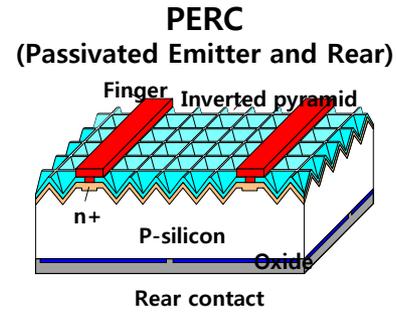
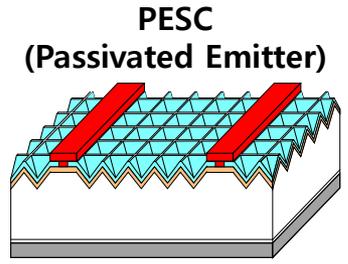
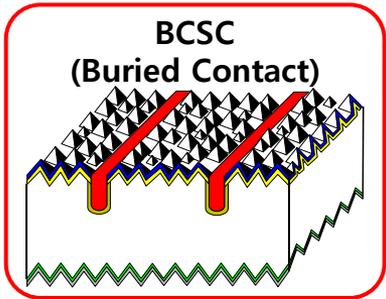
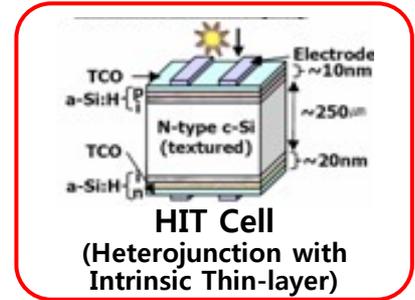
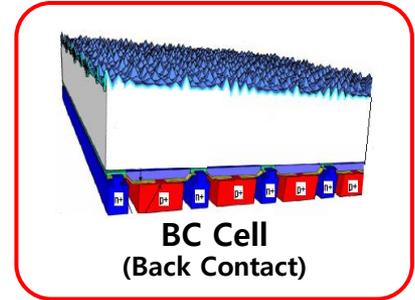
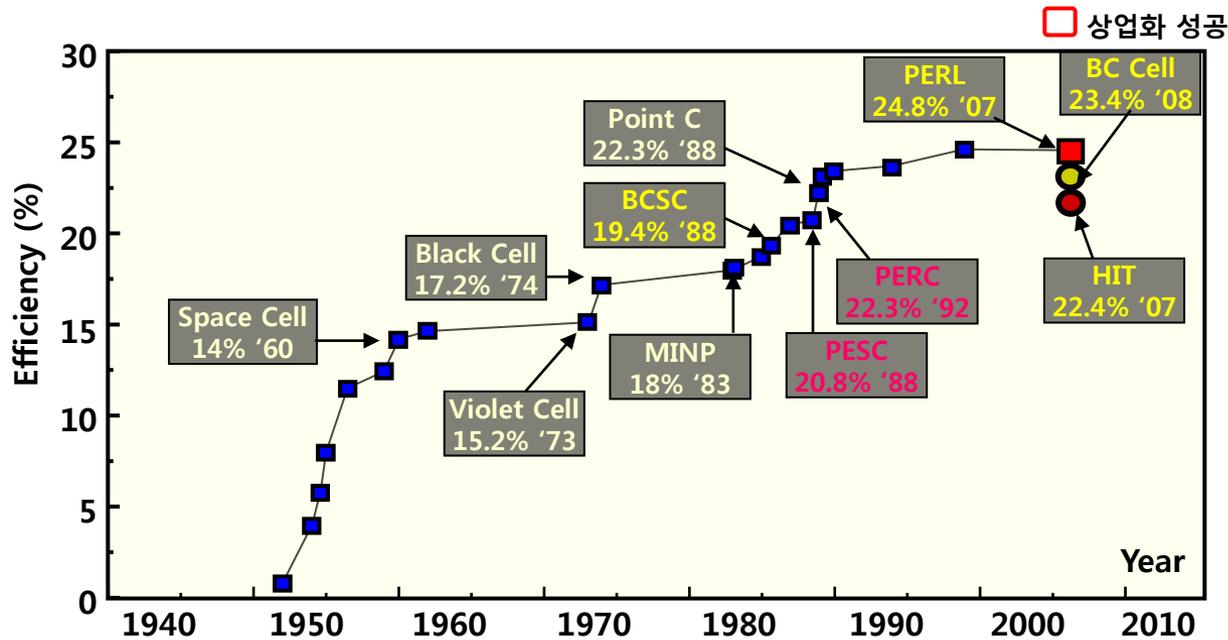
## 태양전지 제조설비

- ① SDR & Texturing
- ② POCl<sub>3</sub> Diff 설비
- ③ HF Wet Bath
- ④ PE-SiN 설비
- ⑤ S-Printer&Dryer
- ⑥ Belt Furnace
- ⑦ LASER 설비

# 결정계 태양전지 효율 History

We are ONE!

- 고효율을 위한 기본 방향 : 광학적 손실 감소 → 전극폭 감소, 반사 제어 (Texturing)  
전기적 손실 감소 → 재결합 감소(도핑), 저저항 전극



# SP 기반 고효율 결정계 태양전지

- Screen Printing Cell : 양면 전극 사용 → Shadowing loss 有, Defect에 둔감  
→ Low quality 기판(p type) 사용 可

## Advance SP 태양전지

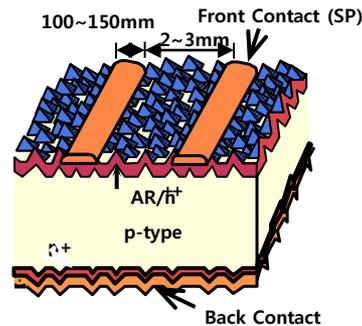
- 특징 : P형 단결정 CZ/다결정 Si 웨이퍼에 범용 SP공정을 적용한 태양전지로 진입장벽이 낮아 중국産 비율이 매우 높음 ('10年 28% M/S)
- 현황 : 現 시장의 주요 제품으로 단결정 17~18%, 다결정 16~16.5%의 전지 효율 [양산]
- 구조 : 單/多결정 p형 Si wafer에 전후면 texturing, 전면 n형 접합 및 AR SiNx, 전후면 전극 형성 구조



[多결정 SP전지]



[單결정 SP전지]



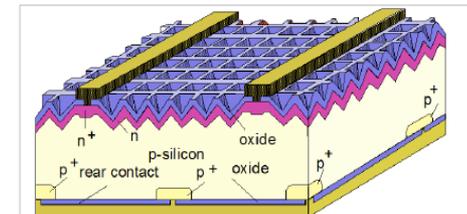
## PERL 태양전지

- 특징 : 최고 효율 구조(PERL)와 SP 기반 기술 적용으로 고효율/저가화를 목표로 함.
- 현황 : 單/多결정 cell 효율 약 19.0%/17.2% 이상 現 100MW Capa. 및 '11~'12年 21% 효율목표
- 구조 : PERL 구조를 적용하며, p-Cz 웨이퍼 적용 random 텍스처링 및 단일 반사방지막, Non-vacuum 전극 공정 및 고온/장시간 산화막 공정 대체



[Pluto전지]

[SP전지]



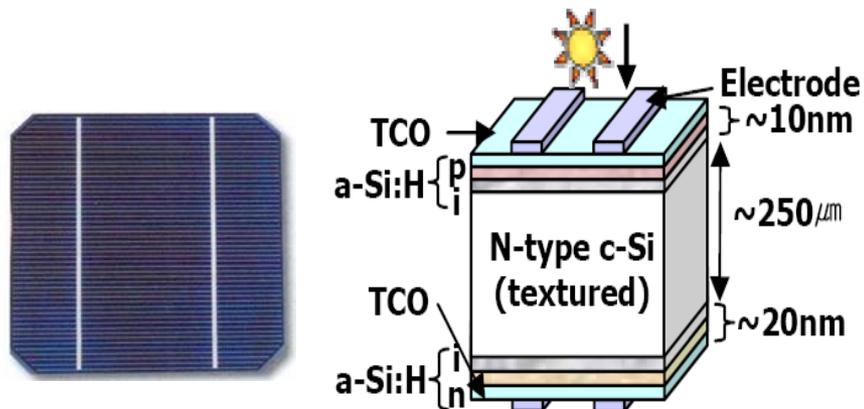
PLUTO Cell Structure

## ■ HIT 및 BC 태양전지 : High quality n-type wafer 사용

- HIT : Intrinsic a-Si passivation에 의한 高 Voc → 고온 출력 안정성 大
- BC : No metal contact on the front → Shadowing loss 無

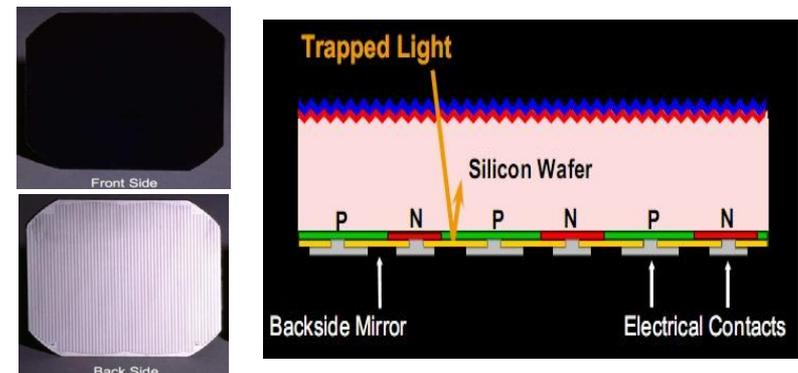
### HIT 태양전지

- 특징 : 단결정 n형 Si wafer에 PECVD a-Si, TCO 증착 기술을 적용한 이종접합 태양 전지
- 현황 : R&D 최고 cell 효율 23.0%, 양산 cell 효율 19% 이상, 양산 모듈 효율 17% 이상
- 구조 : 단결정 n형 Si wafer에 a-Si/TCO/Ag전극



### BC 태양전지

- 특징 : 단결정 n형 Si wafer에 BSG/PSG를 이용한 Junction형성, 전해 도금을 적용한 전극 형성
- 현황 : R&D 최고 cell 효율 23.4%, 양산 cell 효율 20% 이상, 양산 모듈 효율 18% 이상
- 구조 : 단결정 n형 Si wafer에 전면 AR층, 후면에 p, n 층을 모두 형성한 shading loss zero 구조





I Introduction

II 결정계 태양전지(Poly-Si)

III 결정계 태양전지(고효율화)

IV CIGS 태양전지

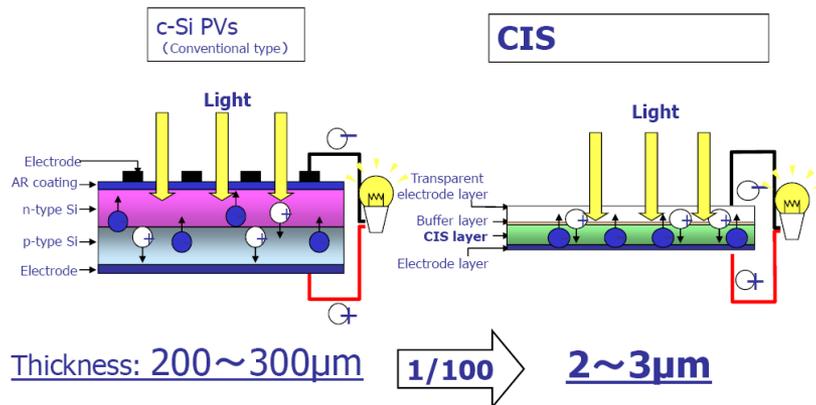
# CIGS 태양전지 소개

- 광흡수층으로 I-III-VI 족 재료인 Cu-(In,Ga)-Se<sub>2</sub> 박막을 사용
- Direct band gap으로 태양전지 재료 중 광흡수 계수가 큼( $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ )  
→ 얇은 두께로 고효율 태양전지 구현 가능
- R&D 효율 20.7% 및 양산 효율 13% 수준.

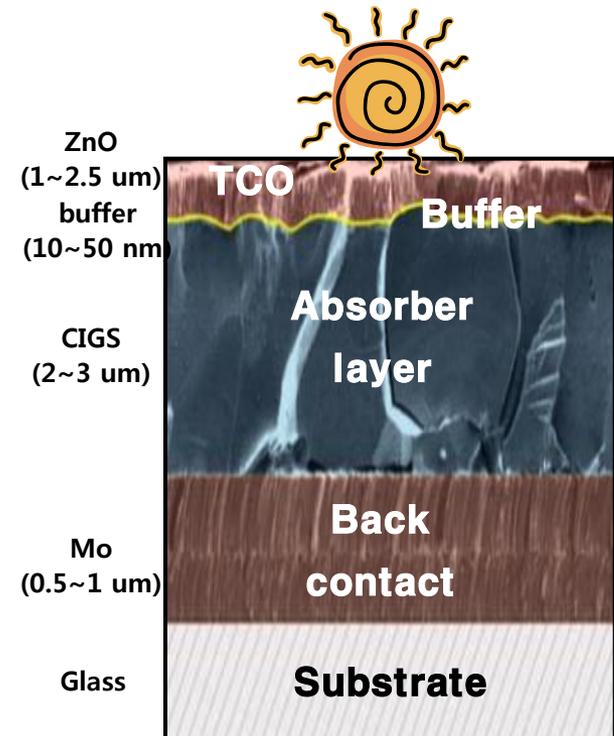
< CIGS 는 I-III-VI 족 화합물 >



< 결정계 Si vs CIGS 박막 태양전지 >

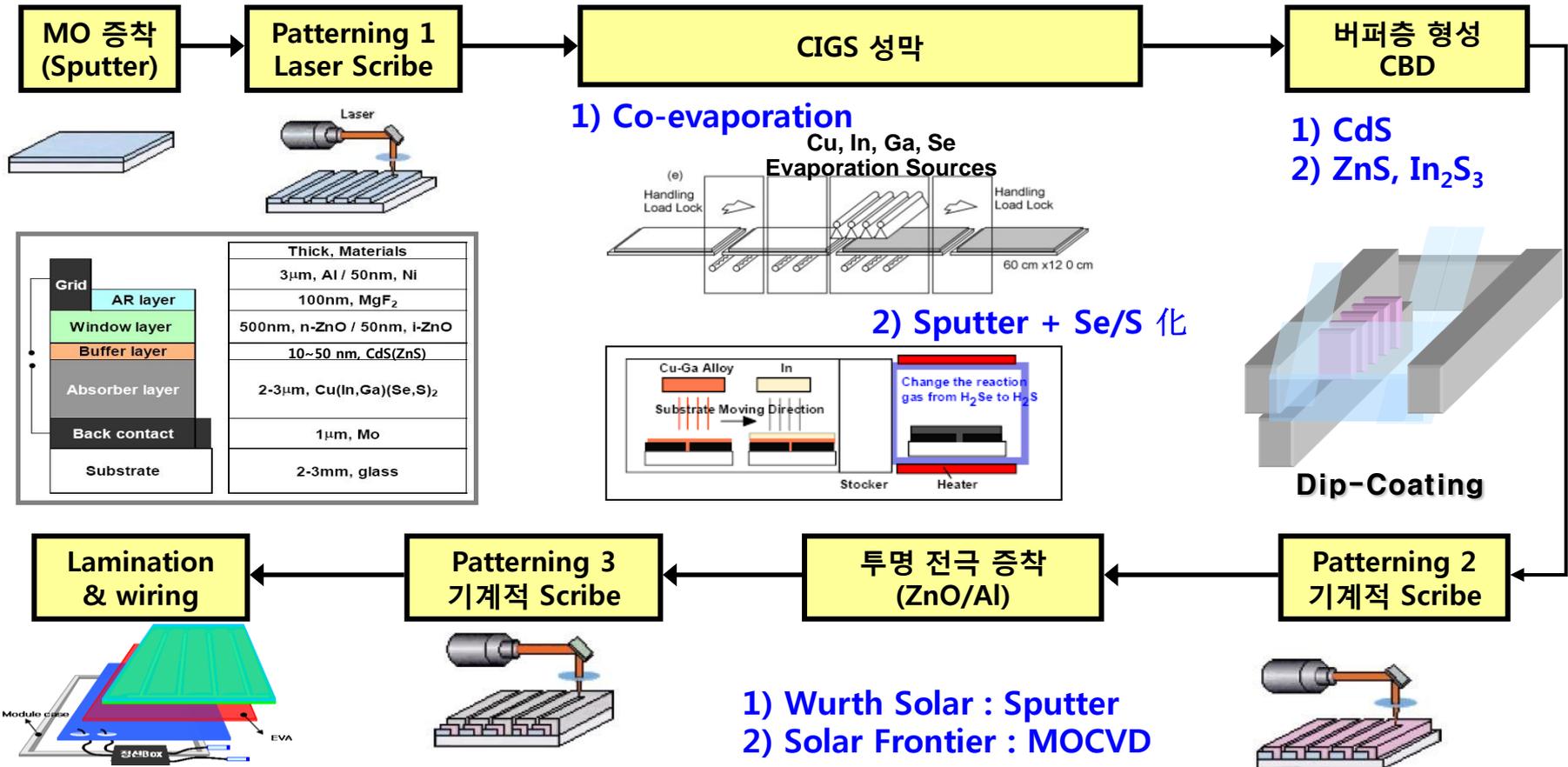


< CIGS 박막 태양전지 구조 >



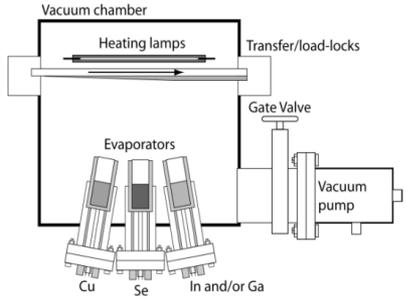
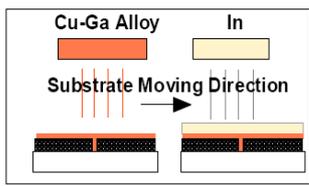
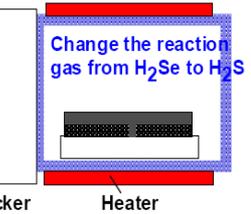
# 제조 공정

- PVD 방식을 적용하여 Mo와 n-ZnO(하부 및 상부 전극) 형성
- Co-evaporation(Sputter) 및 Se화 방식을 적용하여 CIGS 박막 형성



## 핵심 공정 : CIGS 흡수층 형성

- CIGS 태양전지 효율의 key layer
- 각 원소별 조성비 제어 및 단일 phase 형성이 중요함

	Co-evaporation	SPT + Selenization
Process	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 금속원료 (Cu,In,Ga,Se) heating을 통하여 Source를 증발시켜 동시 증착</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Sputtering(Cu,Ga,In) 후 Se 분위기 열처리 (Se diffusion)를 통한 CIGS 형성</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Metal Precursor Deposition Step (DC Magnetron Sputtering)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Selenization/Sulfurization Step (Reaction Furnace)</p>  </div> </div>
적용업체	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Wuerth Solar(獨), Telio solar(韓)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Solar Frontier, Honda (日), Avancis (獨)등</li> </ul>
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 실험실 최고 효율 (20% @NREL)</li> <li>□ 학계 연구 자료 多(→ 실험 장비 단순)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 대형화에 유리</li> <li>□ Throughput 유리</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 독특한 Know-How 필요 → 장비업체 기술 無</li> <li>□ 대형화 어려움 (現 60*120cm<sup>2</sup> 이하)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 국내 연구 경험 無</li> <li>□ Se화 공정이 Key Process</li> <li>□ Turnkey 업체 : Centrotherm (RTP 공정 적용 Se화)</li> </ul>

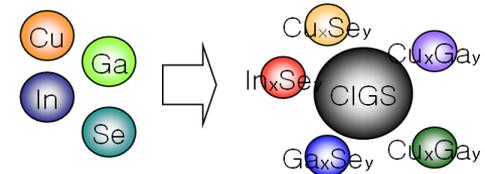
- 단일 phase 형성이 고효율 달성을 위해 중요
- Cu/(Ga+In) 조성비 제어가 고효율 달성을 위한 중요 인자
- 표면 및 grain boundary에서의 defect 최소화  
: Large grain 필수
- 대면적 고효율화(장비 issues)  
: 전 면적 조성비 균일성 확보  
: 결정화에 필요한 온도 균일성  
: Se 공급 균일화(gas flow 등)  
: 대면적에 균일한 Na 공급 문제
- CIGS/Buffer 계면특성 향상  
: FF 및 Voc 향상의 주요 요소

### 【 조성 control 문제 】

- Cu, In, Ga, Se 4원계 Control 불량 時
- 조성비 異常으로 CIGS가 아닌 2次像 형성  
→ 효율 저하 유발

( Precursor )

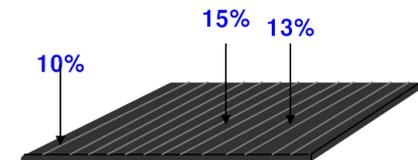
( CIGS + 2次像 )



### 【 효율 편차에 의한 효율 저하 】

- 기관 內 위치별 효율 편차 大 → 효율 ↓
- 조성비 이상 등으로 효율이 낮은 부분 발생  
→ 전체 모듈의 효율을 결정

• 전체 모듈 효율 : ~10%



## □ CIGS 태양전지 셀 최고 효율 20.3%(다결정 Si과 동등 수준)

- ZSW(獨, 태양전지 연구기관)에서 2010.08월 발표\* (2010.09月, 25<sup>th</sup> EU PVSEC, Valencia, Spain)
- 모듈 효율 16.29%(30×30 cm<sup>2</sup>) 최고 효율 발표(SF社(日), 2010.09月, 25<sup>th</sup> EU PVSEC, Valencia, Spain)

## □ 자본력 있는 대기업의 본격 사업 진출 초기

- 소규모 회사에 대기업 자본 투자 증가, 09~10년

회사	Capa.	최근 동향
Solar Frontier (Showa Shell)	1GW('11)	- '10년 04월 출범, Showa Shell 100% 지분*
Saint-Gobain (Avancis-HHI)	100MW('12.1Q, Torgau(獨)) 200MW('12.2Q, HHI)	- Saint-Gobain JV 협력 체결* - '15. 400MW 증산 계획 발표
TSMC (Stion)	200MW('12)	- 2 phase 700MW 증산 계획*
Q-cells (Solibro)	135MW('10)	- '06년 JV설립(Q-cells-Solibro AB) ( Solibro product presentation, 2009. 08 )

\* 출처 : www.pv-tech.org

A large solar panel is tilted on a metal stand in a snowy field. The background shows a sunset with a warm orange glow on the horizon and a dark blue sky. The snow is white and covers the ground. The solar panel has a grid of cells and is the central focus of the image.

**감사합니다**