

# Thema | 고효율 결정질 실리콘 태양전지의 개발현황

김 동 섭  
 세종대  
 전자공학과 교수

## 1. 서론

결정질 실리콘 태양전지는 1941년에 재결정화 된 실리콘에 불순물 석출 효과를 이용해서 만든 변환효율 1% 이하의 태양전지를 시작으로 해서 꾸준한 발전을 거듭하여 1999년에는 24.7%의 변환효율을 달성하였다. 최근에는 지상 발전용 태양전지의 시장이 급격히 증가하면서 결정질 실리콘 태양전지의 중요성이 커지게 되었다. 또한 시장이 본격적인 경쟁체제로 돌입하면서 변환 효율의 증가뿐만 아니라 발전단가와 생산성이 중요하게 되었다. 태양전지 산업이 대량생산 체제로 돌입하게 되면서 변환효율이나 발전 단가에 있어서 아주 작은 기술적 우위도 아주 큰 경제적인 효과로 나타나게 될 것이고 기술개발도 대량생산이 가능한 기술을 전제로 개발이 될 것이다. 본 논문에서는 세계 최고의 변환효율이 발표된 이후로 상용화를 위한 고효율 실리콘 태양전지의 기술적인 발전에 대해서 소개 하고자 한다.

## 2. 결정질 실리콘 태양전지

단결정 실리콘, 단결정 실리콘, 리본 실리콘 기관으로 분류를 할 수 있는데 단결정 기관은 CZ(Czochralski) 기관과 FZ 기관이 있으며 CZ 법으로 성장되지만 결정립이 세 개로 이루어진 삼결정 실리콘 기관도 단결정 기관으로 분류될 수 있을 것이다. 그림2는 태양전지 시장에서 이들 기관들이 시장이 어떻게 변화해 왔는지를 단적으로 보여주고 있다. 전 세계 생산량이 47 MW에 불과 했던 1990년도에는 단결정 실리콘과 다결정 실리콘이 아몰퍼스 실리콘과 함께 비슷한 비율로 시장을 점유하고 있었지만 시장 규모가 약 16배로 증가한 2003년도에는 결정질 실리콘 태양전지의 시장 점유율이 전체 태양전지 시장의 약 95.6%로 급격히 증가하였다. 그 이유는 대량생산, 신뢰성, 수명, 효율과 원료수급 면에서 우수한 결정질 실리콘 태양전지가 태양전지의 시장증가의 주요 원인인 주택 및 소규모 발전소용으로 적합하기 때문이다. 또한 이전의 반도체 산업을 통해서 형성된 원료 생산, 관련 설비, 인적 자원 등과 같은 반도체 인프라를 이용하여 쉽게 대량생산 체제를 갖추므로써 급격히 증가하는 시장 수요에 잘

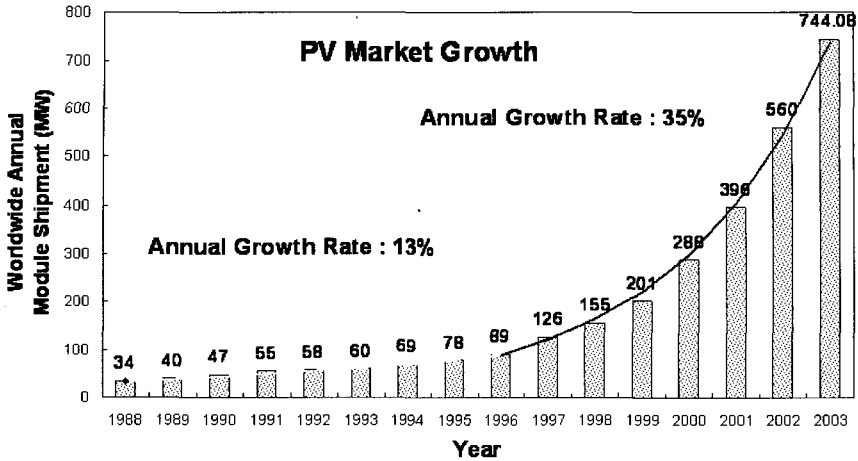


그림 1. 최근 16년간 전 세계 태양전지 시장 성장.

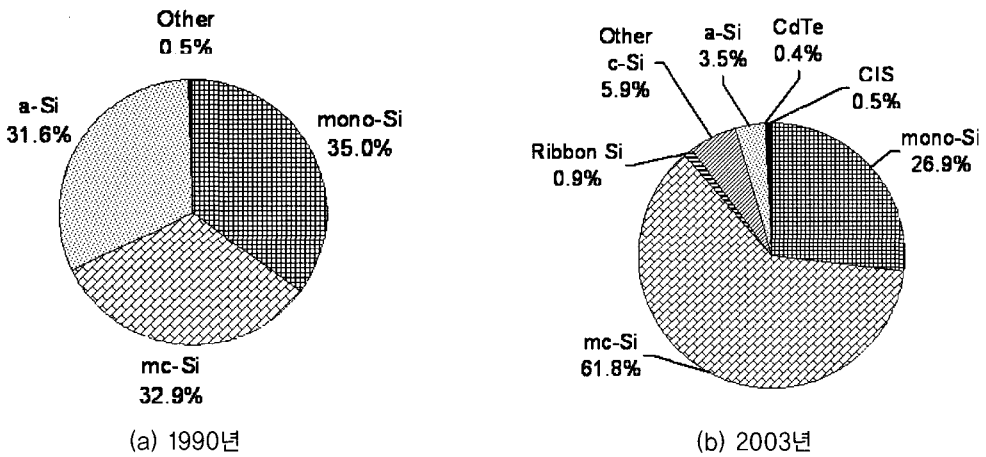


그림 2. 1990년과 2003년의 태양전지 종류별 시장 점유율 비교.

대체할 수 있다는 장점이 있다. 태양전지 전문가들도 최소한 향후 10년간은 결정질 실리콘 태양전지가 시장을 주도할 것으로 예상하고 있다. 결정질 실리콘 태양전지의 가장 큰 단점중의 하나는 기판의 가격이 비싸다는 점이다. 그림 3에는 실리콘 태양전지 모듈의 원가 구성을 나타내었다. 태양전지 모듈가격의 50% 이상이 기판 가격임을 알 수가 있다. 기판가격을 줄이기 위해서는 기판 제조 중에 값비싼 실리콘 원료를 효율적으로 활용하거나 원료를 값싸게 생산하는 것이 핵심이다. 원료를 효율적으로 사용하기 위한 방법으로 기판의 두께를 줄이거나 36-50%에

달하는 kerf loss를 줄이기 위해서 리본 형태의 기판 성장에 대한 연구가 진행되어 2002년도에 4.7%의 시장을 점유하였다. 앞으로 나올 슬리버(Sliver™) 태양전지도 실리콘 원료의 사용량을 줄이기 위한 구조중의 하나이다. 실리콘 원료의 가격을 줄이기 위해서 태양전지급(solar grade silicon) 원료의 개발이 진행되어 거의 실용화를 눈앞에 두고 있다. 결과적으로 태양전지 시장이 커지면서 장기적으로는 기판의 가격은 떨어지지만 품질도 동시에 떨어지게 되어 저가의 기판을 이용한 고효율 태양전지를 제조하는 기술도 점점 더 중요하게 될 것이다. 이러한 관점에서 결

### Si Solar Cells (\$1.98/Wp)

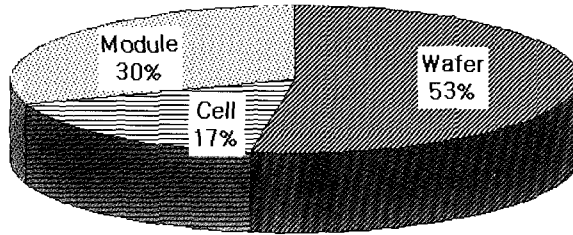


그림 3. 태양전지 모듈의 원가 구성비.

정질 실리콘 태양전지에 관한 연구는 박판기판을 이용할 수 있는 공정이나 구조개발, 기판내부의 여러 가지 불순물을 평가하고 제어할 수 있는 기술, 국부적인 결함의 영향을 최소화 할 수 있는 전지구조나 결함의 패시베이션(passivation) 기술들이 더욱 더 중요하게 될 것으로 생각된다.

### 3. 결정질 실리콘 태양전지 개발현황

2003년도 전 세계 태양전지 시장은 약 742 MW로 최근 7년간 연 평균 35%로 성장하였고 2010년 세계 시장은 3-3.5 GW로 성장할 것으로 예상되며 2010년부터 매년 25%의 시장이 성장할 경우 2030년에는 세계 시장이 300 GW가 될 것으로 기대가 된다. 최근의 급격한 시장 성장은 독일과 일본의 보급 정책에 의한 시장 창출이 주요 원인이라고 볼 수 있다.

결정질 실리콘 태양전지의 연구는 제조 단가를 줄이기 위해서 공정비용을 줄이거나 저가의 기판을 이용하여 변환효율을 높이는 연구에 집중되고 있다. 사진 식각법을 이용한 고효율 태양전지에 사용되는 고가의 공정을 효율의 큰 변화가 없이 저가의 공정으로 대체하는 연구를 하거나 저가와 대량생산에 가장 적합한 스크린 프린팅 태양전지의 단점인 낮은 변환효율을 높이기 위한 연구를 예로 들 수 있다. 스크린 프린팅 태양전지의 경우도 일부 공정은 아직도 대량생산을 위해서는 해결해야 할 몇 가지 문제점들이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 다른 한편으로는 태양전지가 대량 보급됨에 따라서 대량생산에 유리한 생산 설비에 관

한 연구가 장비 업체를 중심으로 연구소 학교와 공동으로 진행되고 있는데 주로 연속(in-line)생산 개념을 적용한 공정개발과 병행하여 개발되고 있다. 태양전지의 제조 가격은 17% 정도로 상대적으로 낮은 편이지만 태양전지의 효율을 결정하는 중요한 공정일 뿐만 아니라 저가의 기판을 사용하였을 경우 기판의 품질(minority carrier lifetime)을 향상시킬 수 있기 때문에 태양전지의 단가를 결정하는데 아주 중요한 역할을 한다. 예를 들면 현재 가장 많이 사용되고 있는 캐스팅 방법은 잉곳의 외곽 부분은 금속불순물이나 산소 불순물이 너무 높아 태양전지로 사용하기에는 부적하지만 태양전지 공정중의 게터링이나 수소화 공정을 통해서 태양전지용으로 사용할 수 있게 된다.

#### 3.1 기판 종류별 기술개발 현황

##### 3.1.1 단결정 실리콘 태양전지

단결정 실리콘 태양전지는 기판의 가격이 다결정 기판에 비해서 비싸지만 (100) 기판의 경우 피라미드 모양의 텍스처링 에칭이 용이하여 반사율이 작고 기판의 품질이 좋기 때문에 효율이 높은 태양전지를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 효율이 높은 태양전지를 사용하게 되면 같은 전력을 얻기 위한 면적이 줄어들기 때문에 모듈제조 비용이나 설치비용, 설치면적 등이 줄어들게 되어 결국 최종 설치 가격은 설치 장소에 따라서 적어질 수도 있다. 이러한 이유로 단결정 태양전지도 계속해서 어느 정도의 시장 점유율을 유지할 것으로 예상된다. 단결정 실리콘 기판의 경우 주요한 결함은 산소와 금속 불순물이다. 금속 불순물이 적은 원료를 사용한다면 소수전하의

수명을 좌우하는 불순물은 주로 산소에 의한 것이라고 볼 수 있다. 산소는 주로 기판 성장 중에 석영도가니에서 유입되는데 도핑물질로 사용되는 보론과 작용하여 LID(light induced degradation)를 일으키는 주요 원인이다. LID 원인이나 현상에 관한 많은 연구가 최근에 진행되어 원인을 제거하는 방법으로 기판의 도핑물질을 갈륨으로 대체하는 연구나 태양전지 공정 중에 고온공정을 조절하여 산소를 불활성화시키는 방법이 효과적임이 알려졌다. 기판에 갈륨을 도핑할 경우는 큰 석출계수로 인해서 성장된 잉곳에서 균일한 도핑농도를 얻기가 힘들다는 단점이 있고 태양전지 공정 중에 열처리하는 공정은 태양전지의 제조조건에 제약을 줄 수 있기 때문에 일부 고효율을 태양전지에 제한적으로 사용될 수가 있다는 단점이 있다. FZ(Float Zone)기판은 성장 중에 실리콘이 접촉하는 물질이 없기 때문에 순도가 높은 기판을 제조할 수 있지만 성장할 수 있는 기판의 크기에 제약이 있고 생산성이 떨어지기 때문에 가격이 비싸다는 단점이 있어서 태양전지 분야에서는 고효율 태양전지에 국한해서 사용되고 있다. MCZ(Magnetic CZ)기판은 성장 중에 용융 실리콘의 유동도를 줄여서 산소의 유입을 최대한 줄이면서 성장하는 방법으로 FZ와 비슷한 변환효율이 보고 되었지만 여전히 산소 농도의 조절이 어렵다. 단결정 기판을 이용하여 태양전지를 제조하는 대표적인 기업은 Shell Solar, BP Solar 그리고 Sun Power 등이 있다. Shell Solar 는 스크린 프린팅 방법에 의해서 태양전지를 제조하고 있고 BP Solar는 BCSC(Buried Contact Solar Cell) 구조의 태양전지를 생산하고 있다. Sun Power는 초기에 사진식각공정을 이용하여 후면에 만 전극을 사용하는 Point Contact형 태양전지를 연구하다가 최근에 스크린 프린팅 방법에 의한 후면전극 태양전지를 제조하여 양산하겠다고 발표하였다.

### 3.1.2 삼결정 실리콘(Tri-crystalline Silicon) 태양전지

삼결정 실리콘 태양전지는 (110)의 결정방향으로 CZ 법을 이용하여 성장시킨 기판으로 3개의 결정이 서로 다른 방향으로 배열되어 있어서 벽개면(cleavage plane)이 각각 다르기 때문에 기판의 강도가 크다는 장점이 있다. 기판의 강도가 크게 되면 웨

이퍼링 할때 기판의 두께를 줄일 수 있고 성장속도를 빨리 할 수 있다는 장점이 있다. 단점은 기판의 성장 방향이 피라미드 형태로 텍스처링하는데 적합하지가 않아서 반사율을 줄이기 힘들다는 것이다. 단결정 기판의 최대 장점은 텍스처링에 의해서 반사율을 크게 줄일 수 있다는 것인데 삼결정은 이러한 장점을 이용하기가 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 텍스처링을 하여 태양전지를 제조한 다음 모듈에 응용하였을 경우 어떻게 태양광을 효율적으로 이용할 수 있는지에 대한 연구가 발표되었다. 최근에는 다결정 기판을 텍스처링할 때 사용되는 등방성 에칭용액을 이용하여  $37\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 높은 전류밀도를 얻을 수 있었다. 그러나 이 경우 전면의 전극의 면적을 4% 정도로 줄이고 반사 방지막으로  $\text{SiNx}/\text{SiOx}$ 의 2중층을 사용한 이유도 전류밀도를 높일 수 있었던 이유 중의 하나이다.

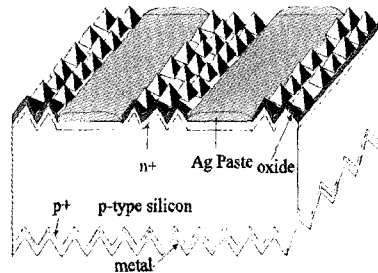
### 3.3 태양전지 구조별 기술개발 현황

그림 4에는 최근에 생산되고 있는 결정질 실리콘 구조를 나타내었고 그림 5에는 아직 생산은 되고 있지 않지만 주목할 가치가 있는 몇 가지 태양전지의 구조를 소개 하였다.

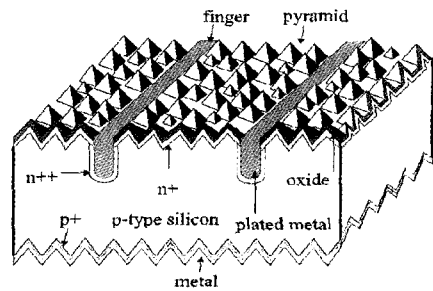
스크린프린팅 태양전지는 전극형성방법이 간단하고 대량생산에 적합하기 때문에 현재 보급되고 있는 대부분의 태양전지가 이러한 방식으로 생산되고 있다. 단점은 전극물질이 순수한 은이 아니라 glass frit성분을 포함하고 있기 때문에 비저항이 크다. 실리콘과의 접촉면에서는 접촉하는 은의 면적이 작고 전극형성 중에 전극 하부에 있는 도핑농도가 높은 에미터 부분의 에칭이 일어나기 때문에 전극저항이 크다는 단점도 있다. 전극저항을 줄이기 위해서 에미터를 깊게 형성해야 하기 때문에 보통 에미터 판저항이  $35\sim 40\text{ ohm}/\text{square}$ 정도가 되어 단파장 영역에서의 반응도가 낮아지게 된다. 이러한 약점을 보완하기 위해서 BCSC(Buried Contact Solar Cell)이 개발되었다. 특징은 에미터를 덮고 있는 절연막을 레이어를 이용하여 선택적으로 제거하고 니켈과 구리를 무전해 도금하여 전극을 형성하는 구조이다. 전지의 성능이나 구조는 스크린 프린팅 태양전지에 비해서 우수하지만 일부 공정이 양산성에 문제가 있

어서 대량으로 보급되지는 못하고 단결정을 이용한 고효율 태양전지 생산에 적용되어 왔는데 전극의 모양이나 공정 단순화를 통한 대량생산을 BP solar에서 발표하였다. 고효율 태양전지로 개발된 태양전지로 Sunpower에서 개발한 후면전극(Point Contact) 태양전지가 있다. 그림에서 알 수 있듯이 shading loss로 작용하는 전면전극이 존재하지 않고 음극과 양극의 전극을 모두 뒷면에 형성시킨 구조가 특징이다. 전극이 한쪽에만 존재하기 때문에 기판의 품질이 좋아야 하고 전면과 후면의 표면 passivation이 아주 중요하다. 지금까지 가격이 높아서 집광형 태양전지나 일부 고효율이 요구되는 특수한 용도에 사용되었으나 최근 후면전극을 값비싼 사진 식각공정을 사용하는 대신 스크린프린팅 공정을 이용하여 형성함으로써 지상용을 대량생산할 수 있는 발판을 마련하였다. 아몰퍼스과 단결정의 장점을 동시에 이용한 구조로 HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)구조가 최근 일본에서 개발되었다. 기존의 태양전지에서 에미터는 고온에서 확산을 시켜서 형성하였다. HIT 구조에서는 p-type과 intrinsic 아몰퍼스를 이용하여 결정질 실리콘에 형성시킨 것이 특징이다. 아몰퍼스 층은 접합만 형성시켜 주고 실제 빛을 흡수하는 영역은 아래의 결정질 실리콘이다. 접합계면에 절연층을 두므로써 전지의 역포화 밀도가 줄어 개방전압을 높이고 온도 증가에 의한 개방전압의 감소도 줄여 일반 태양전지에 비해서 온도 특성이 우수하다. 아몰퍼스 박막의 형성은 보통 400 °C 이하에서 가능하기 때문에 전공정이 저온에서 이루어 진다는 것도 큰 장점이다. 하지만 전면의 아몰퍼스가 전도도가 낮아서 보조전극으로 투명전도막을 사용해야 하는데 투명 전도막에서의 반사나 흡수는 변환효율을 줄이는 단점이 있다. Intrinsic 층을 사용한 경우 변환효율이 21% 이고 사용하지 않은 경우는 13.5%가 보고 되었다.

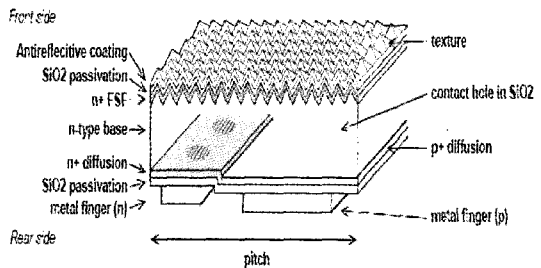
그림 5에는 생산은 되고 있지 않지만 최근에 개발되어 대량 생산을 앞두고 있는 새로운 형태의 태양전지를 나타내었다. CSG 구조는 텍스처링한 유리 기판에 아몰퍼스 실리콘을 증착하고 열처리를 함으로써 결정질 실리콘을 형성하고 레이저를 이용하여 각각의 태양전지로 분리하고 전극을 형성하게 된다.



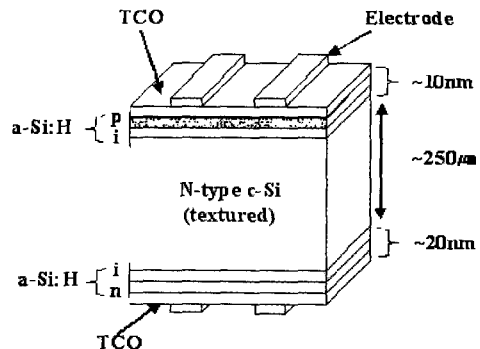
(a) Screen Printed Solar Cell



(b) Buried Contact Solar Cell



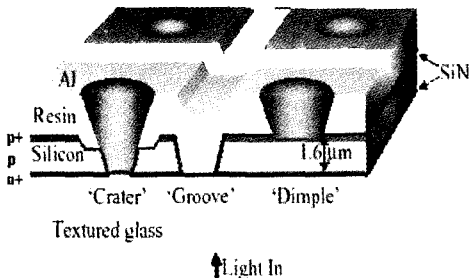
(c) Point Contact Solar Cell



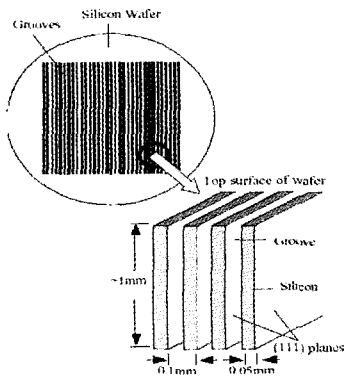
(d) HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

그림 4. 최근에 생산되고 있는 단결정 기판을 이용한 실리콘 태양전지 구조.

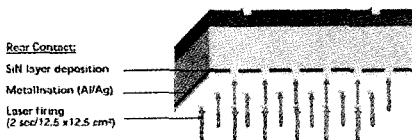
이 태양전지는 호주의 Pasific Solar에서 개발하고 있으며 2003년에 약 9%의 변환효율이 발표되었다. 유리 와 태양전지 사이에 EVA를 사용하지 않기 때문에 UV에 대한 안정성이 뛰어나고 웨이퍼처럼 깨질 염려가 없어서 내구성이 좋은 것도 장점이다. 하지만 아직은 효율이 낮은 것이 단점이다. (b)에는 호주의 ANU와 Origin Energy Solar에서 개발한 태양전지로 Sliver™를 나타내었다. 두께 1mm 의 실리콘 기판을 미세가공법을 이용하여 두께가 60 um 이고 폭이 1mm가 되도록 가공하여 태양전지를 만드는 기술이다. 태양전지의 두께가 60um 로 아주 작지만 전기



(a) CSG(Crystalline Silicon on Glass) Structure



(b) Sliver™ Cell



(c) Laser Fired Contact(LFC) solar cell.

그림 5. 최근에 개발된 새로운 태양전지 구조들.

하나당 변환효율은 19% 이상이 된다. 모듈 뒷면에 lambertian surface를 형성하여 투과된 빛을 다시 전면으로 반사하는 원리를 이용하여 모듈을 만들 때 태양전지를 모듈 면적의 50%에만 깔아도 변환효율을 12.3% 이상을 얻을 수가 있다. 같은 전력을 얻기 위해서 기존의 태양전지에 비해서 약 90% 이상의 실리콘을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 또 모듈을 제조하였을 때 전지간의 간격이 커서 맑은 날 모듈의 온도가 기존의 모듈에 비해서 낮기 때문에 효율의 감소가 적다는 장점도 있다. 전지의 폭이 작기 때문에 접을 수 있는 모듈을 만들 수 있다는 장점도 있고 투과율이 높아서 건물의 유리창에도 사용할 수 있다는 장점이 있다. (c)의 LFC 태양전지는 후면에 전극을 국부적으로 형성시키고 접촉 계면에 알루미늄을 도핑하기 위해서 알루미늄을 증착하고 레이저 빔을 이용하여 어닐링하는 것이 특징이다. 국부적으로 전극을 형성하기 위해서 사진식각을 사용하는 공정에 비해서 훨씬 저렴한 가격으로 생산할 수 있다는 장점이 있다. 후면전극 구조가 기존의 알루미늄 BSF 보다 우수하여 다결정 기판을 이용한 전지에서 가장 높은 효율인 20.3%를 기록하였다.

저자약력



성명: 김 동 섭

◆ 학 력

- 1988년 서울대 금속공학과 공학사
- 1990년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1994년 KAIST 전자재료과 공학박사

◆ 경 력

- 1994년 ~ 1998년 삼성종합기술원 태양전지팀 선임연구원
- 1998년 ~ 1999년 University of Illinois at Urbana Champaign (thin film Si on Glass), Post. Doc.
- 1999년 ~ 2001년 삼성SDI 태양전지팀 선임연구원
- 2001년 ~ 2003년 Georgia Institute of Technology, UCEP(University Center of Excellence for Photovoltaics), Senior Research Engineer
- 2003년 ~ 현재 세종대 전자공학과 교수