

실리콘 태양전지

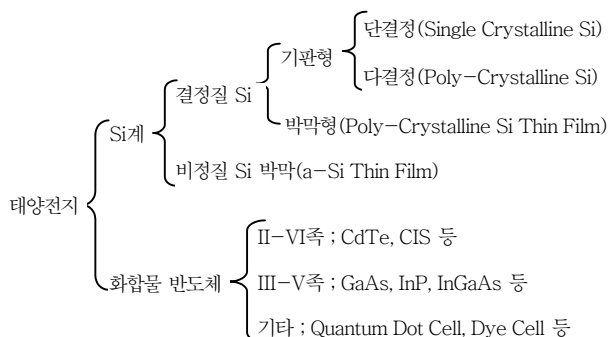
이수홍

1. 서론

최근 지구환경문제와 화석에너지의 고갈, 원자력발전의 폐기물처리 및 신규발전소 건설에 따른 위치선정 등의 문제로 인하여 신·재생에너지에 대한 관심이 고조되고 있으며, 그 중에서도 무공해·무진장의 에너지원인 태양광발전에 대한 연구개발이 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다.

태양전지 제조기술은 태양전지 종류에 따라 실리콘 태양전지와 화합물 반도체 태양전지 등으로 크게 분류할 수 있으며, 현재 상용화되어 시판되고 있는 태양전지는 단결정 및 다결정 실리콘 태양전지, 비정질 실리콘 태양전지 등으로 태양전지의 에너지변환효율은 단결정 실리콘 태양전지가 18%, 다결정 실리콘 태양전지 15%, 비정질 실리콘 태양전지 10% 정도이다. 태양전지 제조기술 개발은 주로 신뢰성 및 에너지변환효율 향상, 저가화에 주된 포인트를 두고 기술개발을 추진하고 있으며, 태양광발전시스템의 설치비용 중 태양전지가 약 40% 이상을 차지하고 있어 태양전지의 저가화는 태양광발전의 핵심기술이라고 할 수 있다.

태양전지는 일반적으로 소재와 제조 기술에 따라 아래 표와 같이 Si계 태양전지와 화합물 반도체 태양전지로 분류되고, 소재의 형태에 따라 기판형과 박막형으로 나뉜다. 다양한 태양전지 중에서 현재 태양광발전용으로 널리 쓰이고 있는 것은 기판형 결정질 Si 태양전지이며, 나머지 대부분은 인공위성 전원 같은 특수한 용도에 한정되어 있으며 개발 단계를 벗어나지 못하고 있다.



실리콘 태양전지는 1954년 미국의 Bell Labs에서 4.5% 효율의 태양전지를 개발하면서 본격적으로 개발이 시작되었다. 이후 1973

년 석유 파동을 겪으면서 관심이 점점 높아지다가 1980년대에 들어서서 결정질 실리콘 기판을 이용한 고효율 태양전지에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 주로 호주, 독일, 일본을 중심으로 연구가 이루어졌고 1985년에는 변환효율 20% 이상의 고효율 실리콘 태양전지가 호주의 UNSW(University of New South Wales)에서 개발되었다.¹ 이와 같은 꾸준한 개발을 통하여 1999년에는 실리콘 태양전지 최고 변환효율인 24.7%를 달성하였다.

최근 발전용 태양전지의 시장이 급격히 성장하면서 결정질 실리콘 태양전지의 중요성이 부각되고 있다. 예를 들어 2005년 태양전지 시장은 1.8 GW에 달했고, 이 중 93.5%를 결정질 실리콘 태양전지가 점유하고 있다.² 이와 같이 시장이 급격히 성장함에 따라 본격적인 경쟁체제에 돌입하면서 변환효율과 발전단가, 생산성이 중요한 영향을 미치게 되었다. 본 논문에서는 최근 실리콘 태양전지의 기본 구조와 원리, 종류 및 기술개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

2. 태양전지의 구조 및 원리

태양전지란 태양광 에너지를 직접 전기에너지로 변화시키는 반도체 소자로써 p 형의 반도체와 n 형 반도체의 접합형태를 가지면 그 기본구조는 다이오드와 동일하다. **그림 1**은 태양전지의 기본 구조와 동작원리를 나타낸 것이다. 태양전지의 구조는 단결정 구조 태양전지의 경우 실리콘(Si)에 5가 원소인(인, 비소, 안티몬) 등을 첨가시킨 n 형 반도체와 3가 원소(붕소, 갈륨) 등을 첨가시켜 만든 p 형 반도체로 이루어진 $p-n$ 접합 구조로 구성을 가지며, 그 기본구조는 다이오드와 동일하다. 외부에서 빛이 태양전지에 입사되었을때 p 형



이수홍

1981 홍익대학교 금속공학과(공학사)
 1986 동경공업대학교 재료과학(공학석사)
 1991 호주UNSW 전자공학과(공학박사)
 1992~ 독일 막스플랑크 고체연구소 객원과학자
 1993
 1994~ 삼성종합기술원, 삼성SDI 태양전지 팀장
 2002
 2002~ 세종대학교 전자공학과 교수,
 현재 전략에너지 연구소 소장

Semiconducting Electrode Materials for Dye-Sensitized Solar Cell

세종대학교 전자공학과(Soo-Hong Lee, Department of Electronics Engineering, Sejong University, 98 Gunja-Dong, Gwangjin-Gu, Seoul 143-747, Korea) e-mail: shl@sejong.ac.kr

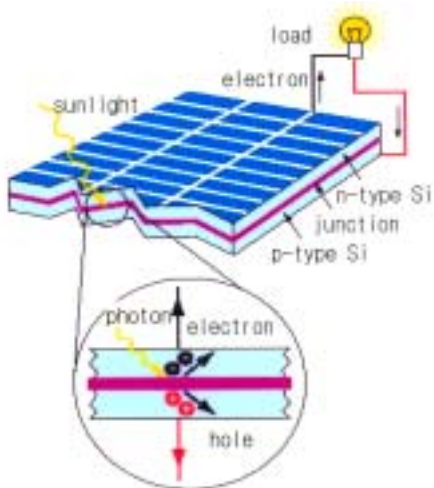


그림 1. 태양전지의 기본구조와 동작원리.

반도체의 전도대 전자는 입사된 광에너지에 의해 가전자대로 여기된다. 이렇게 여기된 전자는 p 형 반도체 내부에 한 개의 전자-정공쌍을 생성하게 된다. 이렇게 발생된 전자-정공쌍 중 전자는 p - n 접합 사이에 존재하는 전기장에 의해 n 형 반도체로 넘어가게 되어 외부에 전류를 공급하게 된다. 여기서 전기장은 p 형 반도체와 n 형 반도체를 서로 결합시켜 접합을 만들면 n 형 반도체에 존재하는 과잉전자는 p 형 반도체로, p 형 반도체에 존재하는 과잉 정공은 n 형 반도체로 확산하게 되며, 확산된 전자-정공의 빈자리는 양이온-음이온을 각각 띄게 된다. 이때 접합 부근에 건전지처럼 양이온에서 음이온으로 전압이 발생하게 되는데 이렇게 발생된 전압차를 뜻한다. 태양전지에서 전기장은 태양광에 의해서 발생된 전자 혹은 정공을 다른 쪽으로 이동시켜 전류를 생성시키는 역할을 한다.

3. 실리콘 태양전지의 종류

3.1 기판 종류별 태양전지

3.1.1 단결정 실리콘 태양전지

시판되고 있는 단결정 실리콘 태양전지 기판은 그 대부분이 IC 제조용으로 생산된 실리콘 규격제품을 다시 재 용융하여 결정을 성장시켜 사용하고 있다. 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 태양전지는 계속 어느 정도의 시장 점유율을 유지할 것으로 예상된다. 단결정 실리콘 태양전지의 변환효율을 향상시키기 위해서는 새로운 구조의 개발, 결정의 고순도화 및 고품질화가 필요하며 이를 위해서는 광전효과를 발생하는 캐리어의 재결합이나 가시광의 기판표면에서의 반사량 감소를 위한 기판 표면의 피라미드 형태의 요철, 전지 내에 입사한 광의 이용효율을 향상시키기 위한 패키징 기술의 개발 등이 추진되고 있다.

3.1.2 다결정 실리콘 태양전지

다결정 실리콘 태양전지는 단결정에 비해 효율이 떨어진다. 그러나 제조공정이 단결정에 비해 간단하고, 고생산성으로 인해 가격면에서 저렴하여 다결정 실리콘 태양전지의 시장 점유율이 높아지고 있다. 다결정 태양전지는 기판으로 고순도 다결정체를 사용하며, 원리적으로는 단결정체와 거의 동일하다. 단결정 실리콘, 다결정 실리콘 기판의 제조는 고도의 기술과 다량의 에너지가 필요하며, 필연적으로 태양전지 제조단가가 높다. 실리콘 태양전지는 고효율이지만 가격이 비싼 문제가 있고, 이에 대한 대책의 하나가 박막형 태양전지이다.

3.1.3 비정질 실리콘 태양전지

비정질 실리콘 태양전지의 특징은 광흡수계수가 결정질 실리콘 태양전지의 10배 이상 높기 때문에 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 정도의 실리콘 막으로도 충분히 제조가 가능하여 기판 소재비가 결정계 태양전지에 비해 1% 이하이다. 결점은 광전변환 효율이 낮아 연구용으로는 10%를 약간 넘는 것이 발표되고는 있지만 실용적인 전지는 7~8% 수준이다. 비정질 실리콘 태양전지의 광전효율을 향상시키기 위해서는 비정질 실리콘과 다결정 실리콘을 적층한 다층구조 전지나 커버 유리 위에 비정질 실리콘 막을 직접 형성하여 유리 기판이 불필요한 기술 등이 연구 개발되고 있다. a-Si용의 기판 유리는 투명 전도막을 피복하여 디바이스로 공급되며 투명 전도막은 저항이 낮은 것이 바람직하다.

비정질 실리콘 태양전지의 가장 큰 문제점은 빛의 조사에 의해 효율감소 현상인 광열화 현상의 발생이다. 이것은 광 발생에 의한 캐리어가 갭 준위에 포획되어 재결합의 원인으로 알려지고 있으며, 이 광열화 현상을 피하기 위해서는 태양전지를 얇게하여 발생한 캐리어를 단시간에 사용하는 것이 효과적이다.

3.2 구조별 태양전지

결정질 실리콘 태양전지 연구는 제조단가를 줄이기 위해서 공정 비용을 줄이거나 저가의 기판을 이용하여 변환효율을 높이는 연구에 집중되고 있다. 사진식각법을 이용한 고효율 태양전지에 사용되는 고가의 공정을 효율의 큰 변화가 없이 저가의 공정으로 대체하는 연구를 하거나 대량생산에 가장 적합한 스크린 프린팅 태양전지의 단점인 낮은 변환효율을 높이기 위한 연구를 예로 들 수 있다. 스크린 프린팅 태양전지의 경우 일부 공정은 아직 대량생산을 위해 해결해야 할 여러가지 문제점들을 가지고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다른 한편으로는 태양전지가 대량 보급됨에 따라서 대량생산에 유리한 생산설비에 관한 연구가 장비 업체를 중심으로 연구소 학교와 공동으로 진행되고 있는데 주로 연속 생산개념을 적용한 공정개발과 병행하여 개발되고 있다.

3.2.1 고효율 실리콘 태양전지

실리콘 태양전지의 역사는 1950년대까지 거슬러 올라가지만 1970년대 중반의 Violet 전지나 Black 전지 이후 약 10년간 효율의 큰 변화가 없었다. 1980년대에는 마이크로 엘렉트로닉스에서 사용하기 시작한 실리콘 산화막을 이용한 실리콘 표면 passivation 기술과 전극의 passivation 기술을 적용하면서 고효율 태양전지 시대가 도래하였다. 이 기술을 이용한 대표적인 전지로는 MINP(metal-insulator-NP junction) 전지와 PESC(passivated emitter solar cell)가 있으며 PESC는 20%의 벽을 넘는 최초의 전지이다.

MINP 태양전지는 최초로 18% 이상의 변환효율을 보인 실리콘

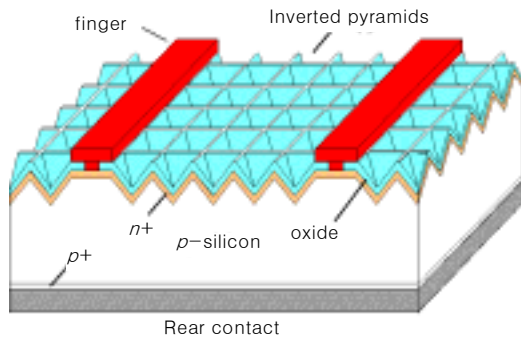


그림 2. PESC 구조.

태양전지로 얇은 SiO_2 막을 이용하여 전면전극과 실리콘 기판 사이의 접촉면을 passivation 시키고 나머지 기판의 전면을 비교적 두꺼운(60 Å) SiO_2 막으로 passivation 시킨 구조의 태양전지이다. 전극의 접촉면과 접촉하지 않은 부분의 산화막의 두께의 차이는 복잡한 공정을 필요로 하지만 최대한의 효율을 얻기 위해서는 불가피한 공정이다. 전면전극으로는 Ti/Pd/Ag 를 형성하였고, 후면 전극으로는 Al 을 사용하였다. 후면전극의 접촉면 부근으로 고농도 도핑하여 후면전계를 형성함으로써 효율을 증가시켰다. 태양전지의 반사손실을 최소화하기 위하여 ZnS 와 MgF_2 를 이용한 이중반사방지막 구조를 적용하였다.

3.2.1.1 PESC 태양전지

그림 2는 MINP 태양전지 보다 변환효율이 더 향상된 PESC 태양전지를 보여주고 있다. PESC 태양전지는 MINP와 비슷한 구조를 가지고 있는데, 다만 전면전극 하부의 얇은 산화막에 흡을 내어 전면전극과 실리콘 기판이 직접 접촉이 되도록 하는 구조를 가지고 있다. 전면의 에미터를 산화막으로 passivation 하고 전극이 형성될 부근의 산화막은 포토리소그래피 공정으로 제거한다. 이때 전극을 passivation 하기 위해서 금속이 증착 될 부분의 면적을 아주 좁게 한다. 알루미늄을 후면에 증착하고 $900\sim 1100^\circ\text{C}$ 에서 1~20시간 열처리 하여 $p+$ 층을 가지는 후면 전극을 형성한다. 표면 passivation은 blue response 향상에 의한 단락 전류밀도를 증가시키고 역표와 전류밀도를 줄여서 개방전압을 증가시키는 역할을 한다. 열처리 공정은 알루미늄 층과 실리콘과의 접촉 저항을 낮추고, 공정 중에 후면에 생길 수 있는 n -type 영역을 제거하고 후면에서 빛을 난반사 시켜 light trapping 효과를 주며, 실리콘 내부의 불순물을 gettering하는 역할을 한다. 결론적으로 PESC 태양전지의 중요한 점은 산화막을 이용한 기판 표면의 passivation과 이러한 산화막을 통한 전면전극의 접촉, 기판의 높은 sheet resistivity, Al 을 이용한 기판 후면의 passivation, texturing과 이중반사방지막을 이용한 반사손실의 저감 등을 들 수 있다. 그러나 후면전극으로 사용된 알루미늄은 위에서 언급한 것과 같이 여러 가지 장점이 있음에도 불구하고 열처리 중에 생기는 후면 결함에 의한 높은 재결합 속도 때문에 전지의 개방전압(open circuit voltage)을 670 mV 이하로 제한하고 단락전류밀도(short circuit current)도 이론 값 보다 아주 낮게 하는 요인이 되었다.

3.2.1.2 PERC(Passivated Emitter and Rear Cell) 태양전지

PESC 태양전지에서 후면 전극 구조를 개선하여 voltage 특성을 향상시키고자 고안된 구조가 PERC(passivated emitter and rear cell) 태양전지이다.

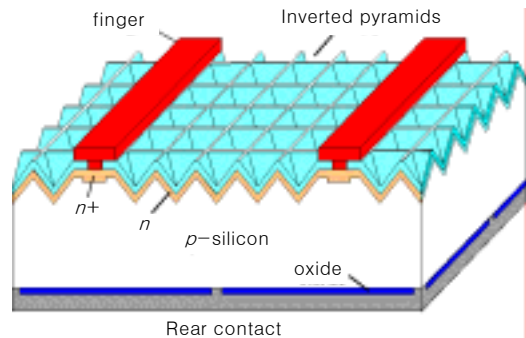


그림 3. PERC 구조.

PESC 전지에서 후면전극 문제를 해결하기 위해서 알루미늄 대신에 보론을 후면에 확산시켜 보았지만 보론 확산은 실리콘 표면에 손상을 주고 실리콘 내부의 life time을 줄여서 오히려 개방전압과 단락 전류밀도를 낮추는 요인이 되었다. PESC의 후면 금속 전극에서 생기는 문제점을 개선하기 위해서는 전지의 에미터 뿐만 아니라 후면도 passivation이 필요하게 되었다. 후면의 알루미늄을 실리콘 산화막으로 대체하고 극히 일부분의 산화막을 제거하여 금속 전극을 직접 실리콘에 형성하는 구조가 개발되었다. 그림 3에 PERC 구조의 개략도를 나타내었다.

$0.2\ \Omega\text{cm}$, p -type 실리콘(도핑농도 $10^{17}/\text{cm}^3$) 기판에서 알루미늄의 접촉저항은 약 $10^{-4}\ \Omega\text{cm}$ 정도이고 one sun 하에서 $0.1\ \Omega\text{cm}^2$ 정도의 specific contact resistance는 전지의 특성에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 후면 알루미늄의 전극 면적이 0.1% 이상이면 전지의 직렬 저항에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 산화막의 성질을 개선하기 위해서 chlorine이 포함된 산화 공정을 적용하였다. 산화막에 의한 표면 passivation은 개방전압을 700 mV 이상으로 PESC에 비해서 크게 증가시켰다. 후면의 passivation은 전면 전극과 실리콘과의 접촉면에 phosphorous를 그 외의 에미터 영역에 비해서 heavy doping 함으로써 약 10 mV의 개방전압 증가를 가능하게 하였다. 열처리를 하지 않기 때문에 후면에서 실리콘과 합금을 형성하지 않은 알루미늄은 실리콘 산화막과 작용하여 후면에서의 빛 반사를 97% 이상 시킬 수 있는 반사막 역할을 하여 light trapping 효과를 향상시켰다. 후면 실리콘 산화막 표면의 알루미늄에 의해서 표면의 재결합 속도를 증가시킬 수 있는 약간의 depletion이 실리콘 표면에 생기지만 실리콘 내부에서의 injection level이 증가하면서 이 문제는 줄어들게 된다. 전면에는 산화막의 두께를 250 Å으로 줄이고 MgF_2/ZnS 를 이중 반사방지막으로 사용하였다. 이와 같은 PERC 구조의 태양전지는 변환효율 23.3%가 보고되었다.⁹

3.2.1.3 PERL(Passivated Emitter Rear Locally Diffused) 태양전지

PERC 구조는 후면 금속 전극이 직접 실리콘에 접촉하기 때문에 전극에서의 재결합 속도가 크고, 접촉저항도 실리콘의 도핑 농도가 작은 경우에는 커지기 때문에 접촉저항을 낮추기 위해서 비저항이 낮은 웨이퍼를 사용해야 한다. 전극 부근의 실리콘을 보론으로 high doping을 하여 전극을 passivation하고 전극의 접촉저항을 낮추는 PERL 구조를 그림 4에 나타내었다. PERL solar cell은 그림과 같이 PERC 구조에서 후면 contact 부분에 국부적으로 $p+$ 층을 형성하여 접촉저항을 낮추고 변환효율을 향상시킨 구조이다. 이 구조에서 단일접합 결정질 실리콘 태양전지의 최고 효율인 24.7%를 기

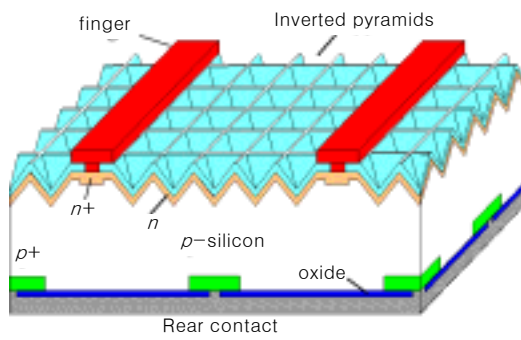


그림 4. PERC 구조.

록하였다.¹¹

3.2.2 상업용 실리콘 태양전지

3.2.2.1 스크린 프린팅 태양전지

지난 50년간 태양광 발전 기술 변화에 따른 제조 공정의 단순화, 신뢰성, 자동화가 가능해 지면서, 현재 지상용으로 사용되는 태양전지는 제조 단가가 낮고 결정질 태양전지의 고효율에 수지가 맞는 스크린 프린팅 태양전지가 개발 상용화되고 있다. 이러한 스크린 프린팅 기술은 금속전극을 형성할 때 은이나 알루미늄 페이스트를 스크린을 이용하여 프린팅하여 전극을 형성한다. 현재 양산화에 적용되는 표준전지 크기는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 와 $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$ 로써 양산 수율을 맞추려면 전지의 대형화, 자동화가 요구된다. 인공위성이나 기타 특수한 용도로 사용되는 고효율 실리콘 태양전지의 금속 전극은 고가의 진공장비 내에서 금속을 증발시켜서 형성하기 때문에 양산 수율에 맞추지 못하는 것이 가장 큰 문제점이다. 이와 같은 한계를 극복한 것이 스크린 프린팅 기술로서 대기 중에서 대면적으로 대량생산이 용이하다는 것이 큰 장점이다. 현재 태양전지 생산라인에서는 1000 wafer/hour의 생산력을 보유하고 있다. 이는 2~3초 사이에 전지가 생산된다는 것을 의미한다. 현재 상용화 되고 있는 스크린 프린팅 다결정 태양전지($10 \times 10 \text{ cm}^2$)의 일반적인 효율이 15%라고 가정하면, 1.5 Wp(전지 하나당 전력)이 된다. 만약 연속공정이 일년 동안 진행이 된다면, $1.5 \text{ Wp/Cell} \times 1000 \text{ cells/hour} \times 24 \text{ hour/day} \times 365 \text{ days/year} \approx 13 \text{ MWp/year}$ 가 된다. 여기서 관리, 보수, 수율을 고려하면, 5~10 MWp/year 정도 생산이 가능하다고 할 수 있다. 그림 5에 스크린 프린팅 태양전지의 구조를 나타내었다. 전지의 전면전극은 은 페이스트로 스크린 프린팅 되어 있고, 후면전극은 알루미늄 페이스트를 이용하여 제작되었다. 이와 같은 스크린 프린팅의 제조 공정은 p-type 다결정 실리콘 웨이퍼(As-cut)의 표면 손상(saw damage)를 제거하기 위해서, 알칼리 용액이나 산 용액에서 에칭하여 표면에 약 $10 \mu\text{m}$ 크기로 텍스처링한다. 전형적인 텍스처링 형성은 일반적으로 5%의 NaOH로 80°C 에서 15분 동안 에칭을 한다. 다음으로 인 확산 공정을 거쳐 n^{++} 에미터를 형성하고, 병렬저항을 줄이기 위해 junction isolation을 여러 가지 방법으로 진행한다. 반사방지막(SiN_x 혹은 TiO_2)을 진공장비로 형성(PECVD, APCVD)하고 전면전극을 스크린 프린팅으로 형성을 하게 된다. 전면전극은 은이 일반적이며, 구리는 열처리 공정 후 실리콘에 큰 오염을 일으켜 보편적으로 은 페이스트를 사용한다. 이러한 페이스트는 점성의 성질은 지니고 있어 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 에서 건조 공정을 거치며, 전지의 후면전극을 형성하기 위하여 스크린 프린팅으로 은과 알루미늄으로서 전극을 형성 후 건조공정을 거친다.

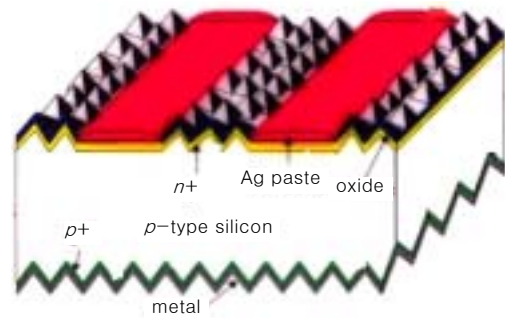


그림 5. 스크린 프린팅 태양전지 구조.

여기서 은과 실리콘이 ohmic contact을 형성하지 못하기 때문에 알루미늄이 요구된다. 알루미늄은 실리콘과의 접촉저항을 줄이고 알루미늄이 재결정화 되면서 후면전계를 형성하여 전지의 전압을 높이는 효과가 있다. 마지막으로 전지의 전면에 반사방지막이 형성되어 있어 직렬저항이 높지만 열처리 과정을 거쳐 전극과 에미터가 접촉되어 저항은 낮게 된다. 페이스트에는 5~10%의 유리성분(Pb, Bi, Si, etc.)이 함유되어 있어 녹는점이 낮고 열처리에 반응이 빨라 페이스트가 반사 방지막을 에칭하면서 실리콘 표면에 도달하게 된다.

현재 상업용으로 가장 많이 적용되고 있는 태양전지는 스크린 프린팅 방법으로 제작되고 있으며, 변환효율은 약 14~16% 수준이다. 스크린 프린팅은 전극 형성이 간단하고 연속적이면서 쉽게 공정에 적용할 수 있다는 장점이 있지만, 전극물질이 순수한 은이 아니라 glass frit 성분을 포함하고 있기 때문에 비저항이 크다는 단점이 있다. 또한 실리콘과의 접촉면에서는 접촉하는 은의 면적이 작고 전극형성 중에 전극 하부에 있는 도핑농도가 높은 에미터 부분의 에칭이 일어나기 때문에 전극 저항이 크다는 단점도 있다. 전극저항을 줄이기 위해서 에미터를 깊게 형성해야 하기 때문에 보통 에미터 면저항이 $35 \sim 40 \Omega/\square$ 정도가 되어 단파장 영역에서의 반응도가 낮아지게 된다. 이러한 약점을 보완하기 위해 BCSC(buried contact solar cell)가 개발되었다.

3.2.2.2 BCSC(Buried Contact Solar Cell) 태양전지

BCSC 태양전지의 특징은 그림 6과 같은 구조로서 에미터를 덮고 있는 절연막을 레이저를 이용하여 선택적으로 제거하고 니켈과 구리를 무전해도금하여 전극을 형성하는 구조이다. 전지의 성능이나 구조는 스크린 프린팅 태양전지에 비해 우수하지만 일부 공정이 양산성에 문제가 있어 대량으로 보급되지는 못하고 단결정을 이용한 고효율 태양전지 생산에 적용되어 왔는데 전극의 모양이나 공정의 단순화를 통한 대량생산을 BP solar에서 발표하였다.

BCSC 태양전지는 표면을 KOH나 NaOH, IPA, 에탄올을 이용하여 이방성 에칭으로 약 $10 \mu\text{m}$ 크기의 피라미드를 형성한다. 에미터 형성은 태양전지가 완성된 다음에 sheet resistance가 $100 \sim 200 \Omega/\square$ 가 되도록 조절한다. 다음에 산화막을 형성하게 되는데 이 산화막은 후속 공정 중이나 제조 후 여러 가지 역할을 한다. 공정 중에 불순물이 실리콘 내부로 침투하는 것을 막아주고 확산공정 중에는 확산 방지막 역할을 하며 도금 중에는 도금 방지막 역할을 하고 또한 완성된 전지에서는 passivation과 반사방지막 역할을 한다. 산화막을 형성한 다음 폭 약 $20 \mu\text{m}$, 깊이 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 홈을 형성하고 전극이 형성될 부분에 인을 고농도로 도핑한다. 알루미늄을 진공 증착기를 이용하여 후면에 증착하고 약 980°C 에서 10~20 시간

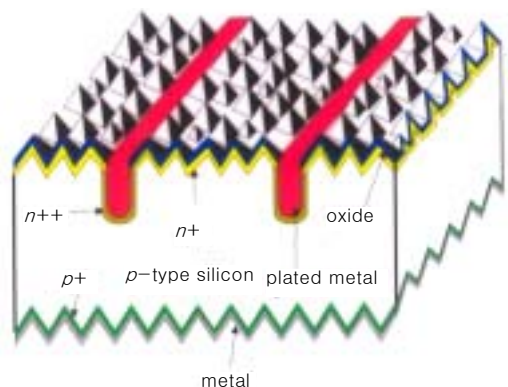


그림 6. Buried Contact Solar Cell.

열처리한다. 전면 전극은 무전해 전기도금 방법을 이용하여 Ni/Cu/Ag 순으로 형성한다. 값이 비싼 은, 타이타늄, 텅스텐 등 대신에 구리를 전극물질로 사용하기 위해서는 실리콘 내부에서 소수 캐리어의 수명을 감소시키는 구리가 실리콘 내부로 확산되어 가지 않도록 해야 한다. 니켈을 무전해 방법으로 약 1 μm 두께로 도금하여 구리가 침투하는 것을 방지한다. 니켈/구리 금속을 이용한 태양전지의 수명은 20년 이상으로 보고되어 있다.

스크린 프린팅 태양전지는 전면전극의 폭이 최소 150 μm 이고 높이는 10 μm 정도로 aspect ratio가 작아서 전극에 의한 shading loss는 10~12%로 비교적 높다. 전면 전극을 형성하기 위해서 사용되는 Ag paste는 가격이 비싸고 내부에 함유되어 있는 glass 성분 때문에 도포한 금속과 실리콘과의 접촉저항이 크고 열처리 한 후의 전극 물질 자체의 저항이 크다. 접촉저항에 의한 직렬 저항 때문에 에너지 손실이 약 20%까지 생긴다. BCSC 태양전지는 홈을 형성하여 전극을 형성하기 때문에 aspect ratio가 3~5 정도로 커서 shading loss가 약 3%로 작고 무전해 도금 방법으로 형성되는 구리전극은 가격이 저렴하고 전기 전도도가 좋다는 장점이 있다. 인 확산을 2단계로 할 수 있기 때문에 전극 부분은 고농도로 도핑을 하고 그 외의 영역은 저 농도로 도핑을 하여 접촉 저항을 줄이고 blue response를 증가시킬 수 있다. 산화막에 의한 표면 passivation과 낮은 농도의 에미터는 양자 효율을 거의 100%까지 증가시킬 수 있다.

3.2.2.3 DSBC(Double Sided Buried Contact Solar Cell)

BCSC에서의 후면 금속 전극은 표면 재결합속도를 증가시켜 개방전압을 낮추는 요인으로 작용한다. 또한 금속을 증착하기 위해서는 값이 비싼 진공증착 장비를 사용해야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 DSBC가 개발되었으며 그 구조를 그림 7에 나타내었다.

PERC이나 PERL 구조에서 후면의 산화막이 passivation 층으로 사용된 것과 같은 원리를 이용하여 후면에 산화막을 형성하고 후면 전극을 BCSC의 전면 전극과 같은 방법으로 형성하였다. 후면의 산화막에 의한 passivation은 표면 재결합속도를 줄여서 기존의 BCSC에 비해서 10% 정도의 효율 향상을 가져올 수 있으며 비저항이 높거나 두께가 얇은 기판을 사용할 경우도 개방전압에 미치는 영향을 BCSC에 비해서 작게 할 수 있다. 산화막에 의한 passivation 효과는 n -type 기판에서 더 크기 때문에 후면에 인을 도핑하여 고립된 n -type 층(rear floating junction)을 형성함으로써 passivation 효과를 높일 수 있다. 또한 진공 증착기를 사용하지 않기 때문에

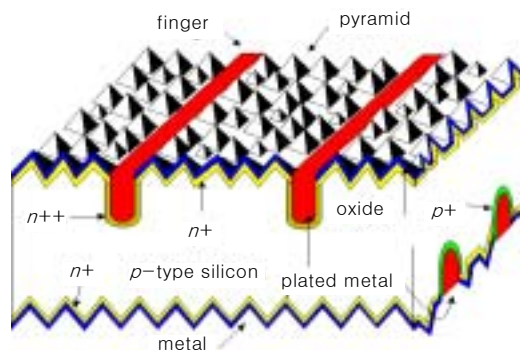


그림 7. DSBC 태양전지.

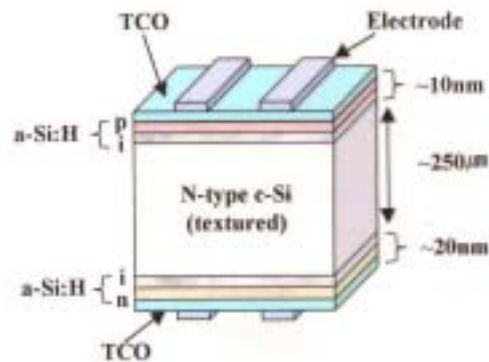


그림 8. HIT 구조.

BCSC에 비해서 제조 단가가 낮은 장점도 가지고 있다. Static concentrator를 사용하여 전지의 후면에도 빛을 입사시켜 전지의 양면을 사용할 경우 태양전지의 면적을 줄일 수 있는 장점도 있다.

3.2.3 태양전지 구조별 기술개발 현황

그림 8과 같은 아몰퍼스 실리콘과 단결정 실리콘의 장점을 동시에 이용한 HIT(hetero-junction with intrinsic thin layer) 구조의 태양전지가 일본에서 개발되었다.⁷ 기존의 태양전지가 고온에서 확산공정에 의해 에미터를 형성시킨 것과는 달리 HIT 구조에서는 p -type과 intrinsic 아몰퍼스를 이용하여 결정질 실리콘에 형성시킨 것이 특징이다. 아몰퍼스 층은 접합만 형성시켜주고 실제 빛을 흡수하는 영역은 아래의 결정질 실리콘이다. 접합계면에 절연층을 두므로써 전지의 역포화 밀도를 줄여 개방전압을 높이고 온도에 의한 개방전압의 감소도 줄여 일반 태양전지에 비해서 온도 특성이 우수하다. 아몰퍼스 박막의 형성은 보통 400 $^{\circ}\text{C}$ 이하에서 가능하기 때문에 전 공정이 저온에서 이루어진다는 것도 큰 장점이다. 그러나 전면의 아몰퍼스가 전도도가 낮아서 보조전극으로 투명전도막을 사용해야 하는데 투명전도막에서의 반사나 흡수는 변환효율을 줄이는 단점이 있다. Intrinsic 층을 사용한 경우 변환효율이 21.3%로 보고되었다.⁸

Sunpower에서 개발한 후면전극(point contact) 태양전지는 그림 9와 같이 shading loss로 작용하는 전면전극이 존재하지 않고 음극과 양극의 전극을 모두 뒷면에 형성시킨 구조가 특징이다. 전극이 한쪽에만 존재하기 때문에 기판의 품질이 좋아야하고 전면과 후면의 표면 passivation이 아주 중요하다. 지금까지 가격이 높아서 집광형 태양전지나 일부 고효율이 요구되는 특수한 용도에 사용되었으나 최근 후면전극을 값비싼 사진식각공정 대신 스크린 프린팅 공

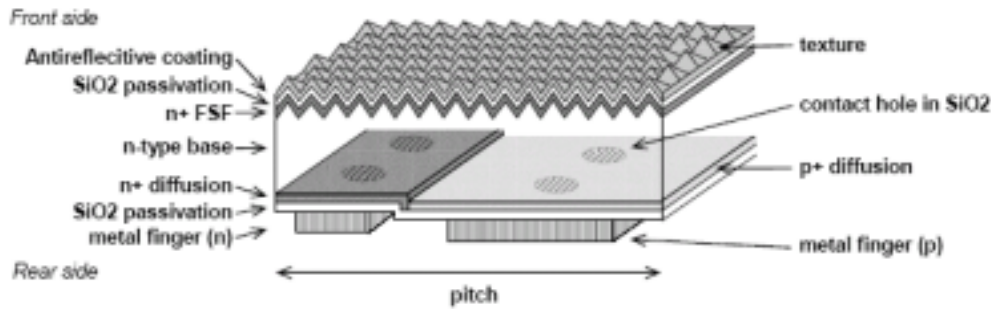


그림 9. Sunpower's low cost rear contact solar cell.

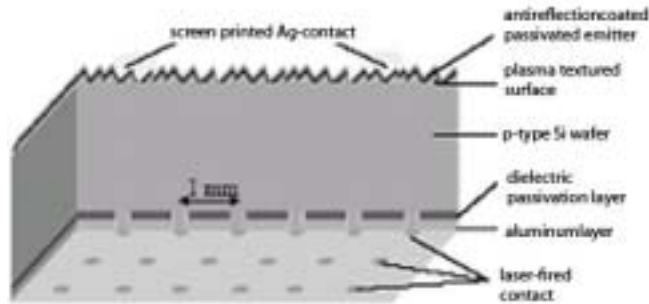


그림 10. LFC solar cell.

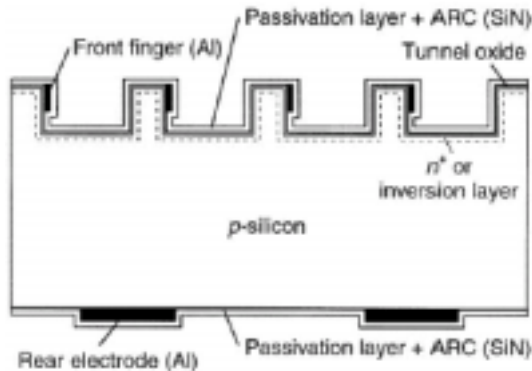


그림 11. OEKO-type solar cell.

정을 이용하여 형성함으로써 지상용을 대량생산할 수 있는 발판을 마련하였다.³ 최근 FZ과 CZ 기판을 이용하여 각각 20.4, 19.5%의 효율을 보고하였다.

독일의 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems에서 개발한 LFC(laser fired contact) 태양전지는 laser를 이용하여 후면 point contact을 PERC 구조의 태양전지와 같은 구조로 형성하는 방법을 적용하였다. 후면에 전극을 국부적으로 형성시키고 접촉 계면에 알루미늄을 도핑하기 위해서 알루미늄을 증착하고 레이저 빔을 이용하여 어닐링하는 것이 특징이다.⁴ 국부적으로 전극을 형성하기 위해서 사진식각을 사용하는 공정에 비해서 훨씬 저렴한 가격으로 생산할 수 있다는 장점이 있다. 후면전극 구조가 기존의 알루미늄 BSF 보다 우수하여 21.3%의 높은 효율을 기록했다.⁵

Obliquely evaporated contact(OEKO) solar cell 구조가 독일의 Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal(ISFH)에서 개발되었다. OEKO cell은 전면에 금속 전극에 의한 shading loss를 줄이기 위해 기계적으로 좁은 홈을 파고, 그림 11과 같이 홈

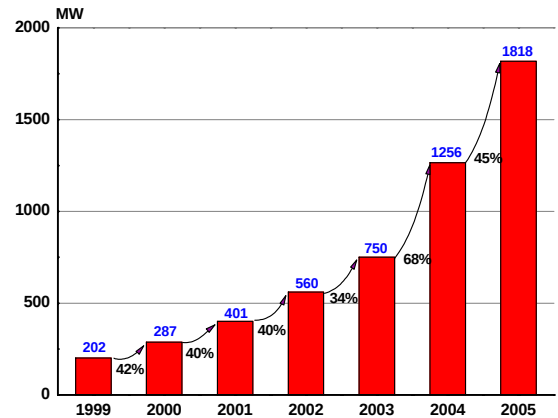


그림 12. 1999년에서 2005년까지 태양전지 시장동향.

의 수직 벽면에 전면 전극 금속을 증착하여 형성한다. 이 기술은 700 wafer/h를 처리할 수 있어 양산이 가능한 방법으로 보고되고 있다.⁶ 4 cm² 면적의 작은 크기에서 OEKO cell은 Fz(B)과 Cz(Ga)기판을 이용하여 각각 변환효율 21.1%, 21.0%를 얻었다.

4. 실리콘 태양전지의 산업동향

그림 12에 1999년 이후 연도별 전세계 태양전지 시장을 나타내었다.² 2005년 태양전지 시장은 1,817.7 MW에 달했고, 이것은 2004년 1,256 MW에 비해 45%가 성장한 결과이다. 비록 2004년 기록적인 68%의 시장 성장보다는 낮은 수치이지만, 전 세계적인 실리콘 부족 현상을 예측하여 2005년 시장성장에 대한 비관적 의견이 지배적인 상황에서 기대 이상의 성장율을 나타내며 2 GW에 가까이 도달하였다.

실리콘 태양전지는 기판에 따라 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 리본 실리콘 그리고 비정질 실리콘 태양전지로 나눌 수 있으며, 단결정에는 FZ(float zone), CZ(Czochralski), Tri-crystal로 나눌 수 있다. 그림 13에는 1999년에서 2005년까지 태양전지 시장에서 각각의 태양전지종류에 따라 시장점유율이 어떻게 변해왔는지를 나타냈다. 전 세계 시장에서 단결정 실리콘과 다결정 실리콘 태양전지의 비중이 90% 이상을 차지하고, 다른 비정질 실리콘, CIS, CdTe를 모두 합하여 약 6.5%가 된다.

전세계 태양전지 생산량이 47 MW에 불과했던 1990년도에는 단결정 실리콘과 다결정 실리콘이 아몰포스 실리콘과 비슷한 비율로 시

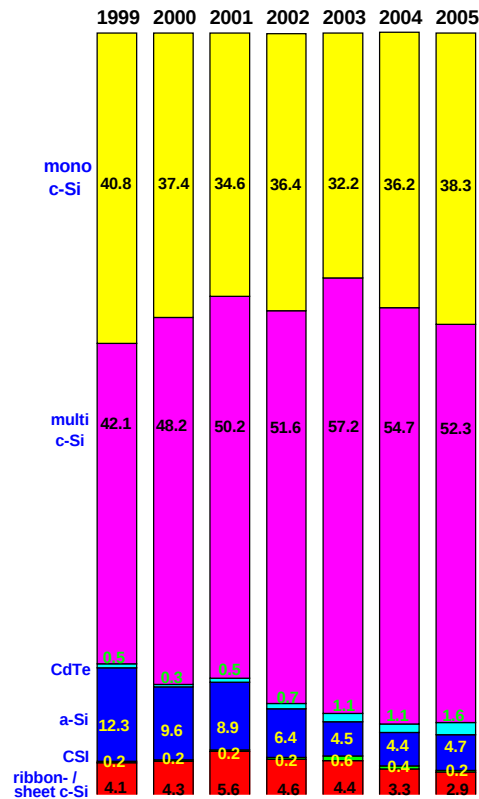


그림 13. 1999년에서 2005년까지 태양전지 종류별 시장 점유율.

장을 점유하고 있었다. 그러나, 2005년도 시장현황을 볼때 결정질 실리콘 태양전지의 시장 점유율이 90% 이상으로 급격히 증가했다. 그 이유는 대량생산, 신뢰성, 수명, 효율과 원료수급 면에서 우수한 결정질 실리콘 태양전지가 태양전지 시장 증가의 주요 원인인 주택 및 소규모 발전용으로 적합하기 때문이다. 또한 이전의 반도체 산업을 통해서 형성된 원료생산, 관련설비, 인적자원 등과 같은 반도체 인프라를 이용하여 쉽게 대량생산 체제를 갖추므로써 급격히 증가하는 시장 수요에 대처할 수 있다는 장점이 있다.

태양전지 전문가들도 최소한 향후 10년 이상은 결정질 실리콘 태양전지가 시장을 주도할 것으로 예상하고 있다. 최근 실리콘 원료 수급 문제로 결정질 실리콘 태양전지 시장이 위축될 것을 한편으로 우려하였으나, 2005년에 전년대비 45% 시장 성장률을 나타내면서 전문가들도 향후 실리콘 태양전지 시장은 물론 전체 태양전지 시장의 지속적인 성장을 내다보고 있다.

4. 결론

전세계 태양전지 시장을 주도하고 있는 결정질 실리콘 태양전지의 기술개발은 보다 저렴한 재료를 이용하고 공정비용을 줄여 태양전지의 가격을 낮추면서 우수한 성능을 얻을 수 있는 방향으로 진행되고 있다. 박막 형태의 실리콘 태양전지 개발이나 박막 화합물 반도체 태양전지, 유기물을 이용한 태양전지 개발 등이 모두 태양전지의 가격을 줄이기 위한 노력의 일환이라고 할 수 있다. 향후 10년 이상 전체 태양전지 시장을 이끌어 나갈 결정질 실리콘 태양전지 역시 제작비용을 낮추면서 성능을 향상시켜 단위 생산 전력당 가격을 낮추는 방향으로 기술 개발이 지속적으로 진행될 것이다.

참고문헌

1. M. Green *et al.*, *Proc. 18th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, p 39 (1985).
2. Photon International, March, 2006.
3. K. R. McIntosh *et al.*, *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, 2003.
4. E. Schneiderochner, R. Prue, R. Lüdemann, and S. W. Glunz, *Prog. Photovoltaics*, **10**, 29 (2002).
5. A. Grohe, E. Schneiderlöchner, M. Hermle, R. Preu, S. W. Glunz, G. Willeke, and S. Walz, *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, 2003.
6. R. Hezel, R. Meyer, A. Metz, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **65**, 311 (2001).
7. M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, N. Nakamura, S. Kiyama, and O. Oota, *Prog. Photovoltaics*, **8**, 492 (2000).
8. M. Tanaka, S. Okamoto, S. Tsuge, and S. Kiyama, *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, 2003.
9. M. A. Green, *10th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisbon, p 250 (1991).
10. J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **66**, 27 (2001).