

Thema | 실리콘 태양전지의 기술개발 현황

이은주 박사과정
 (세종대 전자공학과)
 이수홍 교수
 (세종대 전자공학과)

1. 서론

실리콘 태양전지는 1954년 미국의 Bell Labs에서 4.5% 효율의 태양전지를 개발하면서 본격적으로 개발이 시작되었다. 이후 1973년 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 1.8GW에 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 시장 현황 및 기술개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

2. 실리콘 태양전지 시장동향

그림1에 1999년 이후 연도별 전 세계 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 기대이상의 성장률을 나타내며 2GW에 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. 그림2에는

1999년에서 2005년 까지 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.

전 세계 태양전지 생산량이 47 MW에 불과했던 1990년도에는 단결정 실리콘과 다결정 실리콘이 아몰포스 실리콘과 비슷한 비율로 시장을 점유하고 있었다. 그러나 2005년도 시장현황을 볼 때 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 지속적

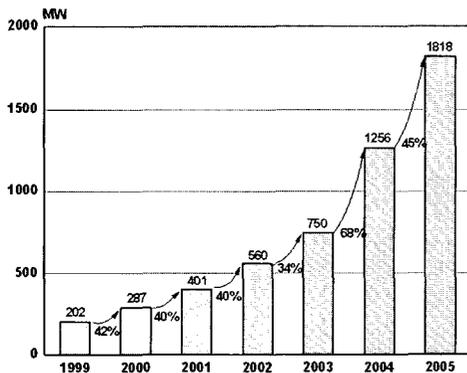


그림 1. 1999년에서 2005년까지 태양전지 시장동향.

인 성장을 내다보고 있다.

3. 실리콘 태양전지 기술동향

결정질 실리콘 태양전지 연구는 제조단가를 줄이기 위해서 공정비용을 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 대량생산에 위해 해결해야 할 여러 가지 문제점들을 가지고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고

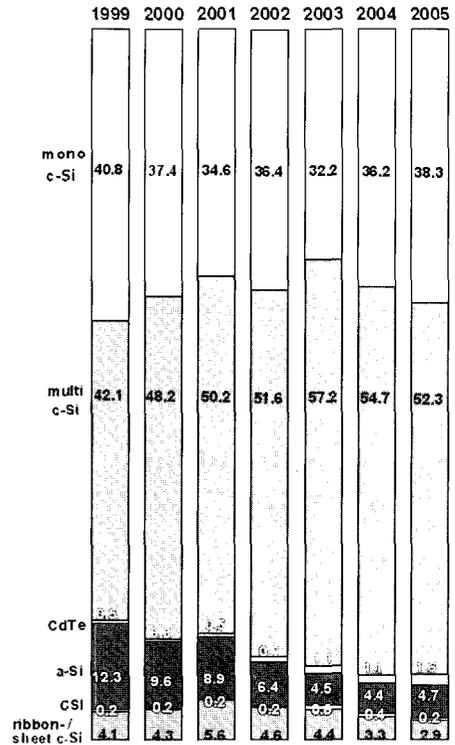


그림 2. 1999년에서 2005년까지 태양전지 종류별 시장 점유율.

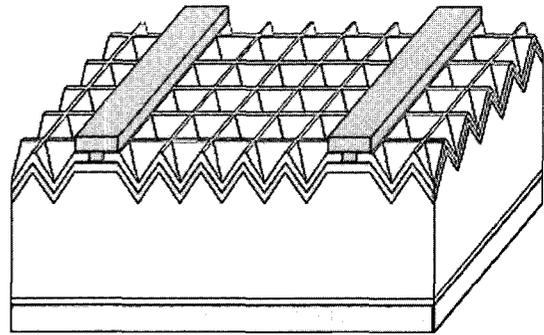
있다. 다른 한편으로는 태양전지가 대량 보급됨에 따라서 대량생산에 유리한 생산설비에 관한 연구가 장비 업체를 중심으로 연구소 학교와 공동으로 진행되고 있는데 주로 연속 생산개념을 적용한 공정개발과 병행하여 개발되고 있다.

3.1 고효율 실리콘 태양전지

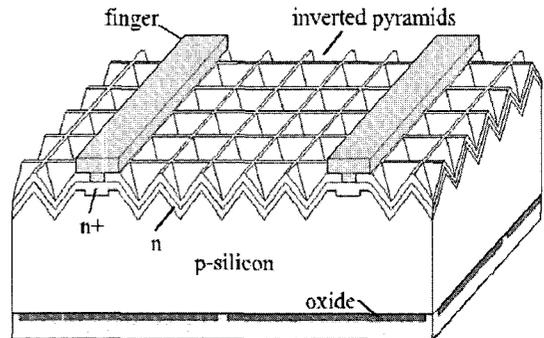
MINP(Metal-Insulator-NP Junction) 태양전지는 최초로 18% 이상의 변환효율을 보인 실리콘 태양전지로 얇은 SiO₂ 막을 이용하여 전면전극과 실리콘 기판 사이의 접촉면을 Passivation 시키고 나머지 기판의 전면을 비교적 두꺼운(60 Å) SiO₂막으로 Passivation 시킨 구조의 태양전지이다. 전극의 접촉면과 접촉하지 않은 부분의 산화막의 두께의 차이는 복잡한 공정을 필요로 하지만 최대한의 효율을 얻기 위해서는 불가피한 공정이다. 전면전극으로는 Ti/Pd/Ag를 형성하였고, 후면 전극으로는 Al을 사용하였다. 후면전극의 접촉면 부근으로 고농도 도핑하여 후면전계를 형성함으로써 효율을 증가시켰다. 태양전지의 반사손실을 최소화하기 위하여 ZnS와 MgF₂를 이용한 이중반사방지막 구조를 적용하였다.

그림3(a)는 MINP 태양전지 보다 변환효율이 더 향상된 PESC(Passivated Emitter Solar Cell) 태양전지를 보여주고 있다. PESC 태양전지는 MINP와 비슷한 구조를 가지고 있는데, 다만 전면전극 하부의 얇은 산화막에 홈을 내어 전면전극과 실리콘 기판이 직접 접촉이 되도록 하는 구조를 가지고 있다. MINP 태양전지와 마찬가지로 PESC 태양전지의 중요한 점은 산화막을 이용한 기판 표면의 Passivation과 이러한 산화막을 통한 전면전극의 접촉, 기판의 높은 Sheet Resistivity, Al을 이용한 기판 후면의 Passivation, Texturing과 이중반사방지막을 이용한 반사손실의 저감 등을 들 수 있다.

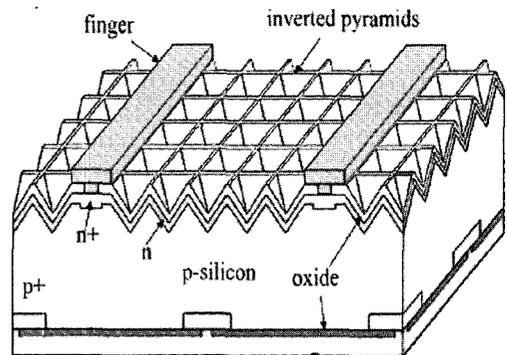
PESC 태양전지에서 후면 전극 구조를 개선하여 voltage 특성을 향상시키고자 고안된 구조가 PERC(Passivated Emitter and Rear Cell) 태양전지이다. PERC 태양전지는 그림3(b)와 같이 후면에 실리콘 산화막을 이용하여 Passivation 하고, Pattern을 이용해 산화막을 Opening 하여 후면전극과 실리콘 기판을 직접 접촉시킨 구조이다. PERC 구조의 태양



(a)



(b)



(c)

그림 3. 고효율 결정질 실리콘 태양전지의 구조 (a)PESC, (b)PERC, (c)PERL.

전지는 변환효율 23.3%가 보고되었다[9].

PERL(Passivated Emitter Rear Locally Diffused) Solar Cell은 그림3(c)와 같이 PERC 구조에서 후면 Contact 부분에 국부적으로 p+ 층을 형성하여 접촉 저항을 낮추고 변환효율 향상시킨 구조이다. 이 구조에서 단일접합 결정질 실리콘 태양전지의 최고 효율인 24.7%를 기록하였다[11].

3.2 상업용 실리콘 태양전지

현재 상업용으로 가장 많이 적용되고 있는 태양전지는 스크린프린팅 방법으로 제작되고 있으며, 변환효율은 약 14-16% 수준이다. 그림4(a)에 스크린프린팅 태양전지의 구조를 나타내었다. 스크린프린팅은 전극 형성이 간단하고 연속적이면서 쉽게 공정에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 단점은 전극물질이 순수한 은이 아니라 Glass Frit 성분을 포함하고 있기 때문에 비저항이 크다는 점이다. 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 35-40 Ω/□ 정도가 되어 단파장 영역에서의 반응도가 낮아지게 된다. 이러한 약점을 보완하기 위해 BCSC(Buried Contact Solar Cell)가 개발되었다. BCSC 태양전지의 특징은 그림4(b)와 같은 구조로서 에미터를 덮고 있는 절연막을 레이저를 이용하여 선택적으로 제거하고 니켈과 구리를 무전해도금하여 전극을 형성하는 구조이다. 전지의 성능이나 구조는 스크린프린팅 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.

3.3 구조별 실리콘 태양전지

그림5와 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 결정

질 실리콘에 형성시킨 것이 특징이다. 아몰퍼스 층은 접합만 형성시켜주고 실제 빛을 흡수하는 영역은 아래의 결정질 실리콘이다. 접합계면에 절연층을 두므로써 전지의 역포화 밀도를 줄여 개방전압을 높이고 온도 증가에 의한 개방전압의 감소도 줄여 일반 태양전지에 비해서 온도 특성이 우수하다. 아몰퍼스 박막의 형성은 보통 400 ℃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. Intrinsic층을 사용한 경우 변환효율이 21.3%로 보고되었다[8].

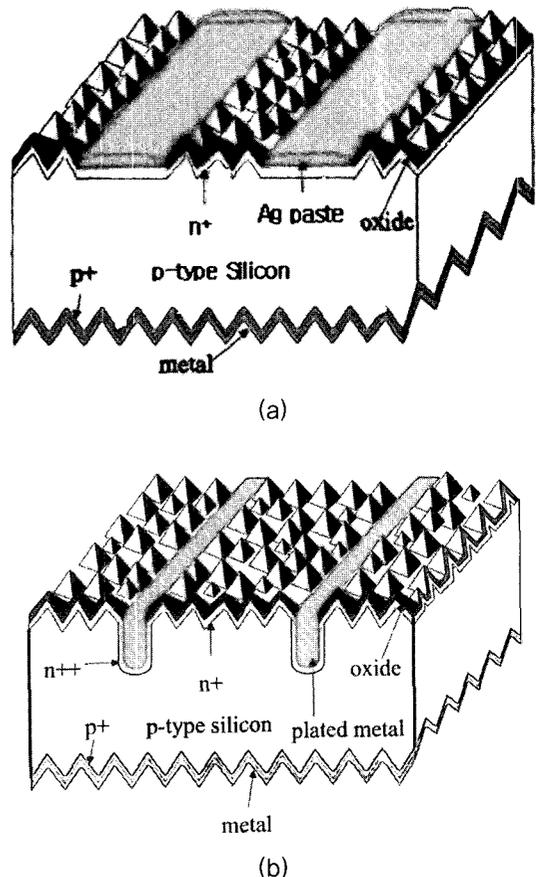


그림 4. (a)스크린 프린팅 태양전지, (b)BCSC.

Sunpower에서 개발한 후면전극(Point Contact) 태양전지는 그림6과 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 스크린프린팅 공정을 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 Contact를 PERC 구조의 태양전지와 같은 구조로 형성하는 방

법을 적용하였다. 후면에 전극을 국부적으로 형성시키고 접촉면에 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 BSF보다 우수하여 21.3%의 높은 효율을 기록했다[5].

Obliquely Evaporated Contact(OECO) Solar Cell 구조가 독일의 Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal(ISFH)에서 개발되었다. OECO Cell은 전면에 금속 전극에 의한 Shading Loss를 줄이기 위해 기계적으로 좁은 홈을 파고, 그림과 같이 홈의 수직 벽면에 전면 전극 금속을 증착하여 형성

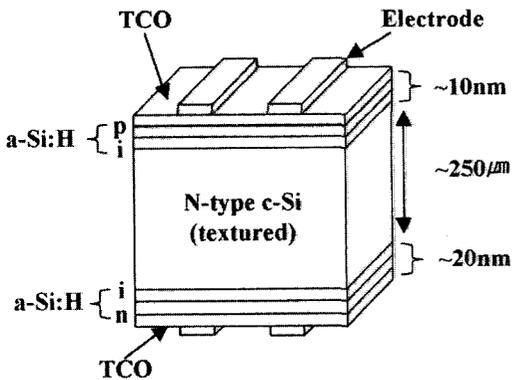


그림 5. HIT 구조.

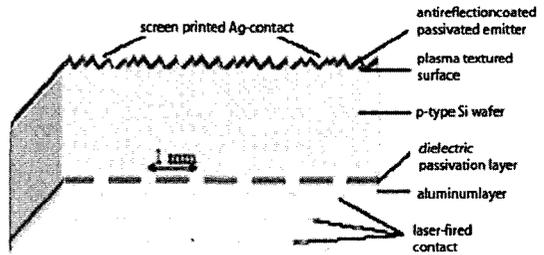


그림 7. LFC solar cell.

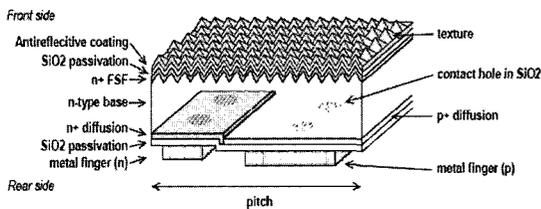


그림 6. Sunpower's Low Cost rear Contact Solar Cell.

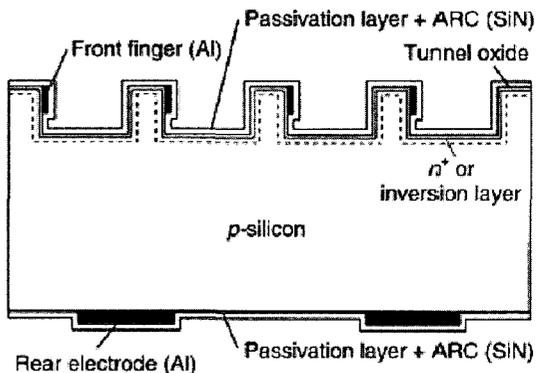


그림 8. OECO-type Solar Cell.

한다. 이 기술은 700 wafer/h를 처리할 수 있어 양산이 가능한 방법으로 보고되고 있다[6]. 4 cm² 면적의 작은 크기에서 OECO Cell은 Fz(B)과 Cz(Ga)기판을 이용하여 각각 변환효율 21.1%, 21.0%를 얻었다.

4. 결론

전 세계 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.

참고 문헌

[1] Green M 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.L?demann, S.W.Glunz, Prog. Photovoltaics 10 (2002) 29.
 [5] A.Grohe, E.Schneiderlöchner, M.Hermle, R.Preu, S.W.Gluenz, G.Willeke, S.Walz, Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 2003.
 [6] R.Hezel, R.Meyer, A.Metz, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 65(2001) 311.
 [7] M.Taguchi, K.Kawamoto, S.Tsuge, T.Baba, H.Sakata, M.Morizane, K.Uchihashi, N.Nakamura, S.Kiyama, O.Oota, Prog. Photovoltaics 8 (2000) 492.
 [8] M. Tanaka, S.Okamoto, S.Tsuge, S.Kiyama, Third World Conference on Photovoltaic Energy

Conversion, Osaka, 2003.

[9] M.A.Green, 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisbon, 1991, p. 250.

[10] J.Zhao, A.Wang, M.A.Green, Sol.Energy Mater. Sol. Cells 66(2001) 27.

저자|약력



성명 : 이은주

◆ 학력

- 1997년 서울시립대 재료공학과 공학사
- 1999년 서울시립대 대학원 재료공학과공학석사
- 현재 세종대 대학원 전자공학과 박사과정

◆ 경력

- 1999년 - 2004년 삼성SDI 중앙연구소 전임연구원



성명 : 이수홍

◆ 학력

- 1981년 홍익대 금속공학과 공학사
- 1986년 동경공업대학 재료과학과 공학석사
- 1991년 호주 UNSW 전자공학과 공학박사

◆ 경력

- 1992년 - 1993년 독일 막스플랑크 고체연구소 객원 과학자
- 1994년 - 2002년 삼성종합기술원, 삼성SDI 태양전지 팀장
- 2002년 - 현재 세종대 전자공학과 교수/전력에너지 연구소 소장