

이종접합 박막 실리콘 태양전지



장 진
경희대학교 물리학과 교수
관심분야: Solid State Devices



문병연
경희대학교 물리학과 박사과정

1 서론

태양광 발전은 무공해의 에너지를 사용하면서도 운전비용이 적고 환경오염이 없다. 또한 지역적 제한성이 없어 태양 빛이 있으면 어디서나 설치가 가능하며, 소음, 진동이 없고, 수명이 길다는 장점이 있다.

실리콘 태양전지는 결정질 실리콘, 다결정 실리콘, 비정질 실리콘 태양전지로 구분할 수 있다. 결정질 실리콘 태양전지는

고품질의 실리콘 결정을 이용하여 전지를 생산하므로 신뢰성이 우수하고 전력변환효율이 높다는 장점이 있는 반면, 단결정을 성장시키는 공정 등 제조공정이 복잡하고 고품질의 실리콘을 사용하므로 제조 가격이 비싸다는 단점이 있다. 다결정 실리콘 태양전지는 단결정에 비해 효율이 떨어진다. 그러나 제조공정이 단결정에 비해 간단하고, 고생산성 등으로 인해 가격면에서 저렴하여 다결정 실리콘 태양전지의 공급도 점차 증가추세에 있다. 박막형태로 제작이 가능한 비정질 실리콘은 결정질 실리콘에 비하여 높은 광전기전도도(photoconductivity)와 높은 광흡수 계수를 가지며, 300 °C 이하의 낮은 온도에서 다양한 기판위에 대면적으로 제작이 가능할 뿐만 아니라 제작공정이 단순하여 제작비용이 저렴하다는 이점이 있다. 1995년 현재 전세계적으로 태양광 발전은 80 MWp/yr 정도이며, 이중 결정질 실리콘이 68.8 MWp, 비정질 실리콘이 9.2 MWp를 차지하고 있다. 또한 1997년에는 태양광 모듈 생산현황이 전세계적으로 122 MWp, 국내에서는 370 kWp에 이르고 있으며, 점점 증가하고 있는 추세이다.

실리콘 태양전지에서 광전류(photocurrent)는 다음 세가지 과정을 통하여 생성된다. ① 빛을 흡수하여 밴드사이에 전하의 천이(transition)가 일어나고, ② 이

때 전자-정공 쌍들이 분리되어 과잉 전하 운반자가 되어, ③ 확산 혹은 내부전기장에 의해 유동(drift)되어 수송된다.

태양전지에서 개방회로 전압(V_{oc} ; open circuit voltage)은 양극에 순방향 바이어스를 점차적으로 증가시킬 때 전류가 영인 상태, 즉 내부의 포텐셜 차이가 영이 되게 걸어준 바이어스로서 태양전지 양극에서 전자와 정공의 축적에 의해 생긴 전위차이다. 단락회로 전류(I_{sc} ; short circuit current)는 바이어스가 없을 때 ($V=0$)의 전류로서 직렬저항이나 분류저항이 없는 경우 광전류와 같고 빛의 세기에 비례한다. 변환효율(conversion efficiency)은 입사된 빛에너지 중에서 태양전지에 의해 전기에너지로 변환되는 에너지량의 비율이다. 한편, 충실도(fill factor)는 다음 식으로 정의된다.

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

여기서, V_m 과 I_m 은 최적동작점(optimum operating point)에서 출력 전압과 출력 전류이다.

2 비정질 실리콘 태양전지

결정질 실리콘 태양전지에서는 전하의 확산거리가 매우 길어 bulk 영역에서 생성된 전하들이 공핍영역(depletion region)으로 확산되어 수집되지만, 비정질 실리콘에서는 금지대 내의 상태밀

도가 높아 갭상태내에서의 재결합(recombination)이나 포획(trapping)에 의해 전하 운반자의 확산 거리가 짧기 때문에 비정질 실리콘 태양전지에서 대부분의 광전류는 공핍층에서 생긴 표동전류(drift current)에 기인한다. 그러므로 비정질 실리콘 태양전지는 공핍층이 넓은 p-i-n형이 적합하다. P-i-n형 비정질 실리콘 태양전지에서 p층은 창물질(window material)로서 전기전도도가 크고, 빛흡수가 적어야 한다. P층의 두께가 얇으면 p층 전체가 공핍층(depletion layer)이 되고 충분한 확산포텐셜(diffusion potential)을 얻을 수 없으므로 개회로 전압이 작아진다. 반대로 p층 두께가 두꺼워지면, 빛흡수가 증가하고, 직렬저항이 문제가 된다. 또한 밴드갭이 큰 물질로서 창층(window layer)을 만들면 단파장 입사광이 직접 I층에서 흡수되므로 단락전류와 충실도를 증가시킬 수 있다. 태양전지의 변환효율은 주로 i층의 국제상태밀도에 의해 결정된다. 두꺼우면 효율적으로 빛을 흡수할 수 있지만 내부 전기장이 약해지며, 직렬저항의 증가로 충실도가 감소한다. 만약 얇으면 내부 전기장은 증가하지만 빛흡수가 적어져서 폐회로 전류가 감소한다. N층은 광운반자(photo carrier)의 역흐름을 막고, 후면전극에 의해 반사된 장파장 빛의 재 흡수를 증가시키기 위해 i층보다 광학적 갭이 작은 미세결정질 실리콘을 사용하는 것이 좋다.

비정질 실리콘 태양전지는 1976년 Carlson[1] 등에 의해 변환효율이 2.4 %인 최초의 비정질 실리콘 p-i-n태양전지가 제작된 이후, 태양전지의 변환효율을 높이기 위한 연구가 계속되어 재료의 특성과 디바이스의 구조를

개선하여 왔다. 태양전지의 효율을 향상시키는 방법으로는 i층에 소량(수 ppm)의 보론을 균일하게 도핑하는 방법, 경계면 부근의 결합상태를 줄이기 위해 경계면에 완충층을 형성하여 광학적 손실을 줄이는 방법, 창물질을 초격자(superlattice)구조로 제작하는 방법, 델타도핑된 p층을 사용하는 방법, 기판 전극의 반사를 줄이는 방법, 다중전지를 만들어 분광 반응도를 높이는 방법 등이 이용되고 있다. 제작방법과 구조에 따른 비정질 실리콘 태양전지의 특성은 다음과 같다.

Fujukake[2] 등은 p형 a-SiO:H를 사용함으로써 12.5 %의 변환효율을 얻었으며, Ma[3] 등은 미세결정질 실리콘($\mu\text{c-Si}$)을 p, n층에 적용하고, 또 광학적 밴드 갭을 증가시키기 위하여 탄소를 첨가함으로써 변환효율이 12.3 %인 태양전지를 제작하였다. Tsuge[4] 등은 굴곡이 있는(texture) 부평전극을 사용함으로써 100 cm^2 의 면적에서 10.2 %의 변환효율을 얻었다. 태양전지 표면에서 반사 때문에 표면으로 침투되는 광자의 수는 입사되는 광자의 수보다 작다. 반사를 줄이기 위해 실리콘 산화층 등으로 반사 방지 코팅(antireflective coating)을 한다. 다른 방법으로는 표면을 texture화하면 입사광은 직접적으로, 또는 반사한 뒤보다 많이 흡수되므로 전체적인 표면 광반사를 감소시킬 수 있다. 또한 Ashida[5] 등은 $(\text{a-SiC}_x/\text{a-SiC}_y)_n$ 다층막을 p층으로 사용하고, p-i, n-i 완충층(buffer layer)을 사용하여 변환효율 13.2 %의 태양전지를 제작하였다. 완충층은 광캐리어들의 역확산을 막고, n층이나 p층의 도펀트들이 i층으로 침투하는 것을 막기 위해 사용될 수 있다.

이론적인 계산[1,6]에 의하면 비정질 실리콘 태양전지의 최대 변환효율이 15% 정도인 것으로 받아들여지고 있다.

3 다결정질 실리콘 태양전지

이종접합형 비정질 실리콘 태양전지는 저가격, 대면적 제작에 적합한 기술이지만 결정질 실리콘에 비해 효율이 떨어지고, 구조적으로 불안정하여 신뢰성이 낮으므로 수명이 비교적 짧고, 사용함에 따라 효율이 감소하는 열화현상이 나타난다. 이것을 극복하기 위한 방법중의 하나가 다결정 실리콘을 이용한 태양전지를 제작하는 것이다. 다결정 실리콘 태양전지는 단결정에 비해 효율은 떨어지지만 저장치비, 고생산성 등으로 가격도 저렴한 편이어서 점차 공급이 증가추세에 있다. 다결정 실리콘을 제작하는 방법에는 레이저에 의한 결정화(Laser Crystallization), 고상결정화(Solid Phase Crystallization: SPC), 액상 결정화(Liquid Phase Crystallization), 기상 결정화(Vapor Phase Processing) 등이 있다. 다결정 실리콘 태양전지의 제조 방법과 구조에 따른 변환효율은 다음과 같다.

3-1. Casting 다결정 실리콘을 이용한 태양전지

Machida[7] 등은 casting 방법에 의한 $100\ \mu\text{m}$ 두께의 p형 multicrystalline 실리콘 기판으로 n'-p-p' 형태의 전지를 제작하였다. 그 구조를 그림 1에 보였다. Multi-blade wheel grinding 방법으로 표면에 V-shaped groove를 형성하여 1 cm^2 의 면적에서 18.6 %, $100 \times 100\text{ cm}^2$ 의 면적에서 17.2 %의 변환효율을 얻었다. Inomata[8] 등은 casting 방

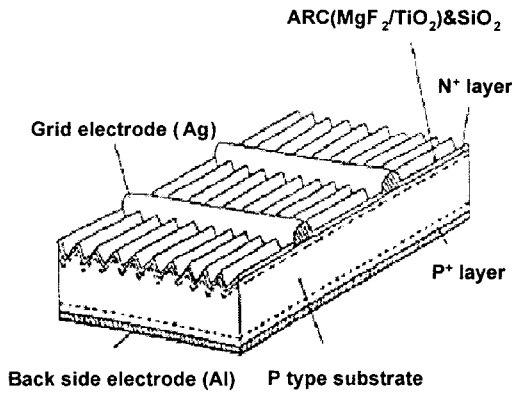


그림 1. Multi-blade wheel grinding법과 casting 법을 이용한 태양전지.

법에 의해 제조된 270 μm 두께의 p형 multicrystalline 실리콘(mc-Si)을 기판으로 사용하여 n'-p-p' 형태로 제작하였으며 RIE(reactive ion etching)법으로 면을 texture화 시켰다. 변환효율은 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 의 면적에서 17.1%였다.

3-2. 플라즈마 CVD 다결정 실리콘을 이용한 태양전지

Reehal[9] 등은 PACVD(plasma assisted CVD)를 사용하여 n'-p-p' 다결정 실리콘 형태로 제작하였다. 탄소기판을 사용하였고, 기판온도는 800 $^{\circ}\text{C}$, RF 전력은 30 W였다. Si층의 두께 10~15 μm 로 제작된 전지의 변환효율은 0.17 cm^2 의 면적에서 5.3%를 보였다.

Nakajima[10] 등은 plasma CVD를 이용한 다결정 실리콘 전지를 제작하였다. Glass/ n' poly-Si/ i poly-Si/ p $\mu\text{c-Si:H}$ / ITO의 구조에서 intrinsic 다결정 실리콘의 두께는 3 μm 였으며, 0.25 cm^2 의 면적에서 변환효율 8.6%의 특성을 나타냈다. 그 후 Yamamoto[11] 등은 PECVD(plasma enhanced chemical

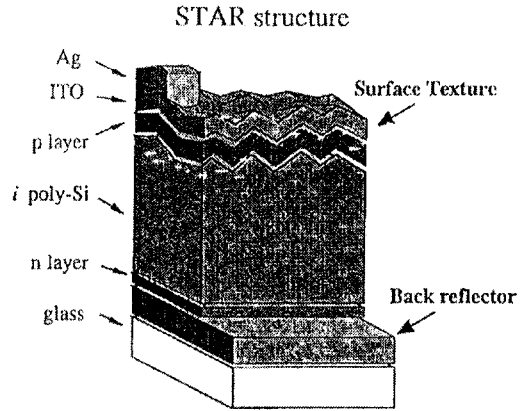


그림 2. STAR 구조를 가진 poly-Si 태양전지.

vapor deposition)을 사용하여 그림 2에서 보여진 것처럼 STAR(surface texture and enhanced absorption with a back reflector) 구조로 n-i-p 다결정 실리콘 형태의 전지를 제작하였다. 유리기판을 사용하였고, 기판온도는 550 $^{\circ}\text{C}$, cell의 두께는 1.5~3.5 μm 였다. 0.5 cm^2 의 면적일 때 변환효율은 9.8%였다.

또한 Meier[12] 등은 70 MHz의 VHF(very high frequency) 글로우 방전으로 p-i-n $\mu\text{c-Si:H}$

물질로 사용될 가능성을 보였다. i 층의 두께 1.7 μm , cell 면적 5 mm^2 일 때 4.6%의 변환효율을 보였다. 그 이후의 연구[13]에서는 변환효율이 7.7%로 빛에 대한 열화현상이 거의 없는 p-i-n형 $\mu\text{c-Si:H}$ 전지를 제작하였다. Saitoh[14] 등도 PECVD를 사용하여 p-i-n $\mu\text{c-Si:H}$ 형태의 전지를 제작하였다. 기판온도 200 $^{\circ}\text{C}$ 이하, i 층의 두께 1 μm 일 때 1 cm^2 의 면적에서 변환효율은 대략 5%였다.

한편 Kaneiwa[15] 등은 rear

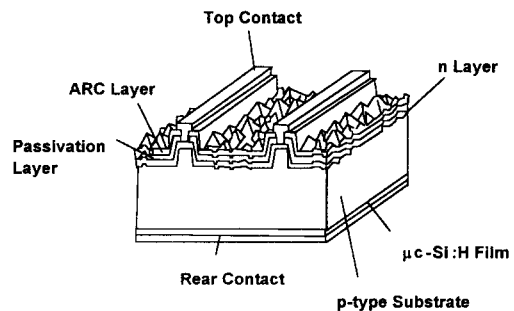


그림 3. c-Si 기판과 B-doped $\mu\text{c-Si:H}$ film의 이중접합으로 제작된 태양전지.

형태의 전지를 제작함으로써 미세 결정질 실리콘이 photovoltaic

contact에서 recombination을 줄이기 위한 방법으로 B-doped

c-Si 기판과 PECVD로 제작된 B-doped $\mu\text{c-Si:H}$ film 의 이중 접합을 연구하였다. 그림 3에서 보여진 구조로 제작되었으며, B-doped $\mu\text{c-Si:H}$ 박막의 증착 온도가 150 °C, 두께가 200 nm 정도일 때 가장 좋은 특성을 보여, $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 의 면적에서 19.6 %의 변환효율을 나타내었다. B-doped c-Si 기판의 비저항은 1-4 Ωcm 였으며, texture된 면 위에 인을 열 확산시켜 p-n 접합을 형성하였다.

3-3. LPE(liquid phase epitaxy) 다결정 실리콘을 이용한 태양전지

Werner[16] 등은 p형 LPE 다결정 실리콘에 인을 확산하거나 p/n을 증착하여 전지를 제작하였다. 제작온도는 600~900 °C, LPE 층의 두께는 20 μm 였다. 면적 1 cm^2 에서 변환효율은 14 %였다. Zheng[17] 등에 의해 제작된 n'-p-p' 형태의 전지는 4.11 cm^2 의 면적에서 16.4 %의 변환효율을 보였다. 이 구조를 그림 4에 보였으며, LPE 다결정 실리콘의 두께는 32 μm 였다.

3-4. SPC (solid phase crystallization)와 ZMR (zone melting recrystallization) poly-Si를 이용한 태양전지

Matsuyama[18] 등은 SPC poly-Si을 이용하여 p a-Si/ n poly-Si/ n' poly-Si 구조의 전지를 제작하였다. 비정질 실리콘을 PECVD로 제작한 다음 550~650 °C에서 SPC방법으로 재결정화하여 1 cm^2 의 면적으로 제작된 전지에서 9.2 %의 변환효율을 보였다.

한편, Arimoto[19] 등은 carbon strip heater를 사용한 ZMR 방법에 의한 poly-Si을 이용하여 태

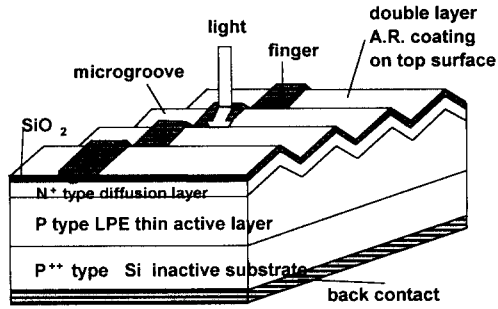


그림 4. LPE 방법으로 제작된 실리콘 태양전지.

양전지를 제작하였다. SOI(silicon on insulator) 구조로서 CVD로 poly-Si를 증착한 다음 ZMR 방법으로 재결정화하고, 그 위에 활성층의 다결정 실리콘을 CVD로 증착하였다. 자세한 구조는 그림 5에 나타나 있다. 이 전지는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 면적에서 변환효율 14.2 %를 보였다.

c-Si:H 박막은 PECVD로 200 °C에서 제작되었다. 이 전지는 0.25 cm^2 의 면적에서 2.46 %의 변환효율을 나타냈다.

3-6. Hot Wire CVD 다결정 실리콘을 이용한 태양전지

Rath[21] 등은 다결정 실리콘

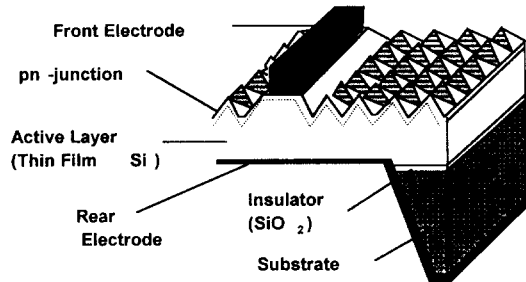


그림 5. Zone melting recrystallization 방법으로 제작된 태양전지.

3-5. Laser Annealing

Yamamoto[20] 등은 KrF 엑시머 레이저 어닐링 방법을 이용하여 다결정 실리콘 태양전지를 제작하였다. 70-300 nm 의 heavily boron doped a-Si 을 480 °C에서 PECVD로 제작한 후 레이저 에너지 밀도 200~350 mJ/cm^2 으로 결정화한다. 다음 550 °C 이하의 온도에서 PECVD로 slightly p-type doped poly-Si를 증착한다. 마지막으로 n-type μ

태양전지 제작에 HWCVD를 사용하였으며, 이 때 구조는 n'c-Si/i poly-Si (1.5 μm)/ buffer layer (3nm)/ p $\mu\text{c-Si:H}$ (30 nm)/ ITO 의 형태였다. I 층은 HWCVD로 기판온도 480 °C에서 제작되었고, p 층 $\mu\text{c-Si:H}$ 은 PECVD를 사용하여 제작되었다. 변환효율 3.15 %를 보였다.

3-7. HEM 으로 제작된 태양전지

Rohatgi[22]등은 HEM(heat exchanger method) 방법으로 제작된 multicrystalline 실리콘을 이용하여 n'-p-p' 형태의 다결정 실리콘 태양전지를 제작하였고, 1 cm²의 면적에서 변환효율은 18.6 %를 보였다.

4 이중결합을 이용한 박막 실리콘 다중전지

비정질 실리콘 이중접합은 저가격으로 대면적 태양전지를 제작하는데 적합한 기술이지만 효율이 결정질 실리콘에 비해 떨어지고, 수명이 비교적 짧고, 사용함에 따라 효율이 감소하는 열화현상이 나타난다. 빛에 의한 열화현상은 풀어야 할 과제이다. 광학적 밴드갭이 다른 얇은 전지를 2~3개 이용하는 다중전지(stacked cell)를 제작함으로써 빛에 대한 안정성을 개선시킬 수 있는데 그 이유는 다음과 같다.

1) 비정질 실리콘 다중전지는 단일전지에 비해 내부 전기장이 약 2배정도 강하기 때문에

영향을 많이 받는데 이러한 bottom i층이 받는 빛의 세기는 top cell의 p층으로 입사되는 최초의 빛세기의 약 1/2정도이다.

3) 비정질 실리콘에서 일반적으로 백색광의 단파장영역의 빛이 장파장영역의 빛에 비해 열화현상이 심한데 다중전지의 bottom i층이 받는 빛은 장파장영역의 빛이다.

4) 비정질 실리콘 단일 전지의 경우 i층의 두께가 2000 Å 이하인 경우 빛에 대한 안정성이 높는데 비정질 실리콘 다중전지의 top i층은 강한 빛이 입사되지만 단일전지에 비해 두께가 얇고 내부전기장이 강하다.

다중전지에서 i층의 물질 선택에 대해서는 그림 6에 나타난 것처럼 에너지 갭 배열 ($E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$)과 흡수계수 배열 ($\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$)의 selection rule이 필요하다. 또한 각층에서 생성된 전자와 정공 쌍들이 재결합에 의한 손실없이 광전류에 기여하게끔 두께를 결정하여야 한다.

다중전지의 구조와 제작방법에

Ichikawa[23]는 a-Si/ a-Si tandem형 전지를 제작하였다. Top cell과 bottom cell의 i층 두께가 각각 70 nm, 300 nm 일 때, 1 cm² 면적에서 12 %, 30×40 cm²의 submodule인 경우 10.5 %의 변환효율을 얻었다. 한편 Yang[24] 등은 PECVD를 이용하여 p-i-n형의 a-Si/ a-SiGe/ a-SiGe 삼중 접합 태양전지를 제작하였고, 0.25 cm²의 면적에서 안정화 효율은 13 %였다.

4-2. 비정질 실리콘/다결정 실리콘 (또는 미세결정질 실리콘) 다중전지

Saitoh[14] 등은 PECVD를 사용하여 p-i-n형 a-Si/ μ c-Si tandem 전지를 제작하였고, 구조는 그림 7에 나타나 있다. 1 cm²의 면적에서 초기화 변환효율은 9.4 %, 안정화된 변환효율은 8.5 %였다. Yamamoto[11] 등은 PECVD를 사용하여 STAR 구조의 poly-Si 전지를 만들었고, 이것을 2중, 3중 태양전지 제작에 이용하였다. 면적 0.5 cm²으로

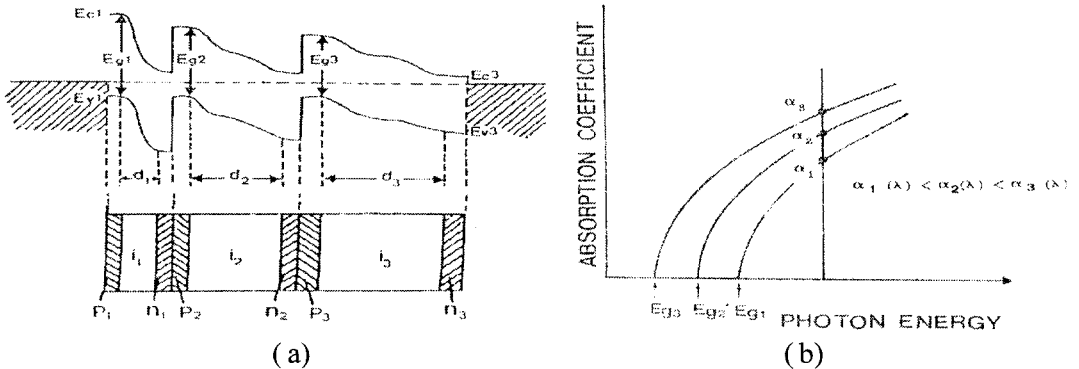


그림 6. 3중 태양전지의 에너지 밴드(a)와 흡수계수 및 에너지 밴드 갭(b).

photocarrier의 재결합이 단일 전지에 비해 적게 일어난다.

2) 비정질 실리콘 다중전지의 열화현상은 bottom i층에 의해

다른 특성은 다음과 같다.

4-1. 비정질 실리콘/비정질 실리콘 다중전지

제작된 a-Si:H/ poly-Si형 2중 전지와 a-Si:H/ poly-Si/ poly-Si형 3중 전지에 대해서 변환효율은 각각 11.2 %와 11.5 %였다.

Nakajima[10] 등은 PECVD로 a-Si/ poly-Si tandem cell을 제작하여 12.1 %의 변환효율을 얻었다.

Ma[25] 등은 Plasma CVD와 ECR(electron cyclotron resonance) PCVD를 사용하여 그림 8에서와 같은 구조의 a-Si/ poly-Si four terminal tandem cell을 제작하여 변환 효율 21 %

Ag
ITO
n ($\mu\text{c-Si}$)
i ($\mu\text{c-Si}$) 1.6 ~ 2.4 μm
p ($\mu\text{c-Si}$)
n ($\mu\text{c-Si}$)
i ($\mu\text{c-Si}$) 0.25 μm
p/i (a-SiC)
p (a-SiC)
SnO ₂
Glass Sub

그림 7. a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ tandem 태양전지.

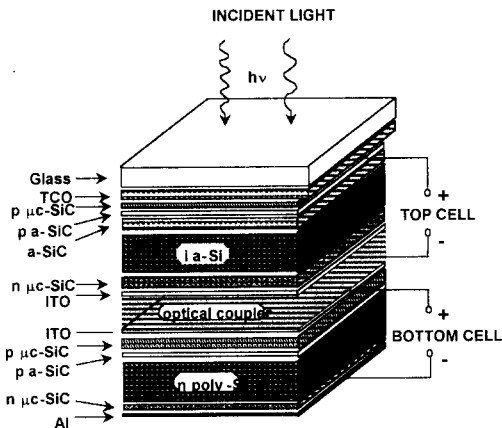


그림 8. a-Si/poly-Si tandem 태양전지.

를 얻었다. 또한 tandem형 태양 전지에서 변환효율은 top cell과 bottom cell의 광학적 밴드갭과 i

층의 두께에 의존함을 보였고 또한 top cell과 bottom cell의 광학적 밴드갭과 i층의 두께를 적당히 조절함으로써 28 % 이상의 변환효율을 나타낼 수 있음을 시사하였다. 2중 태양전지에서 top

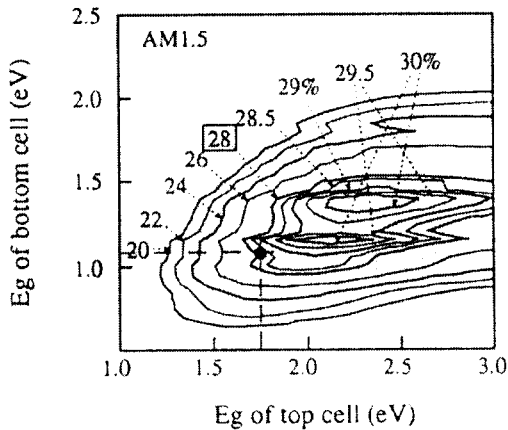


그림 9. Top cell 과 bottom cell의 광학적 갭에 따른 변환효율.

cell과 bottom cell의 광학적 밴드갭에 따른 이론적인 변환효율

의 변화는 그림 9에 나타나 있다.

그림 10은 위에서 보여진 다결정질 실리콘 태양전지와 다중전지의 제작방법과 구조에 따른 변환효율을 나타낸다.

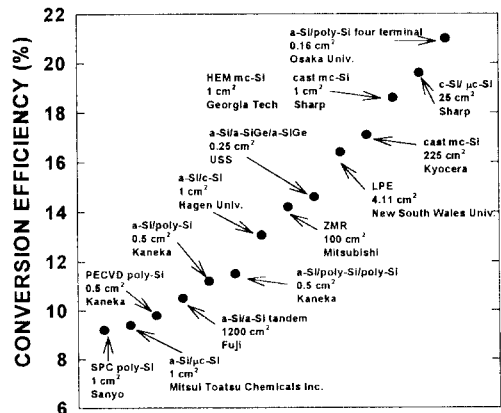


그림 10. 다결정질 실리콘 태양전지와 다중전지의 구조 및 제작 조건에 따른 변환효율.

5 결정질 실리콘 태양전지

그림 11은 연도에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 변환효율의 변화를 나타낸다. 1941년과 1995년에 제작된 태양전지의 구조가 각각 나타나 있다. 1941년 대 초 간단한 p/n 접합형태로 제작된 이후, 기술적인 발전을 거듭해 왔다. 1995년 PERL (passivated emitter and rear locally diffused) 구조를 사용해 4 cm²의 면적에서 24 %의 변환효율을 보였다.

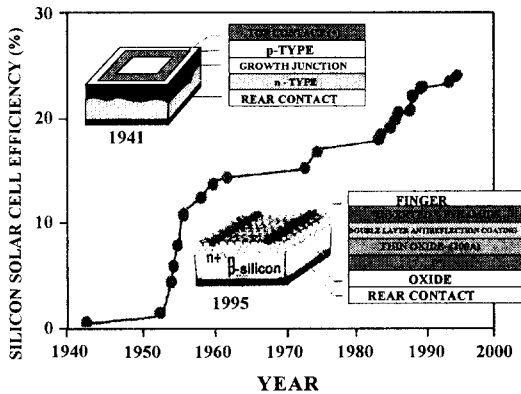


그림 11. 연도에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 변환효율.

6 실리콘 박막태양전지 제조기술의 전망

현재 태양전지 시장에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 것이 단결정 실리콘 태양전지이다. 단결정 실리콘 태양전지는 bulk상태의 원재료로부터 태양전지를 만들기 때문에 원재료비가 비싸고, 공정이 복잡하여 가격면에서 한계가 있다.

비정질 실리콘 태양전지는 유리기관을 사용함으로써 저가격으로 대면적화가 가능하지만 효율이 낮고 열화현상으로 효율이 급격히 떨어지는 단점이 있다.

다결정 박막 실리콘은 최근에

주목을 받기 시작하였는데, 태양전지의 고효율, 저가격화, 대면적화를 위해 몇몇 그룹에서 다결정 실리콘 박막을 태양전지에 응용하여 가능성이 제시되었으며, 그 발전 가능성이 아주 크다.

최근에는 다결정 실리콘, 미세 결정질 실리콘, 비정질 실리콘을 동시에 사용하는 적층형의 다중 박막전지가 점차 발전될 것으로 기대된다.

한편 본 경회대에서는 저온

공정으로 다결정 실리콘을 제작하기 위한 노력을 계속하여 상당한 진전을 보이고 있다. ICP-CVD(inductively coupled plasma CVD)를 사용하여 350 °C 이하의 저온에서 그래인 크기가 1000 Å인 다결정 실리콘 박막을 제작하였으며, 또한 금속유도결정화(metal induced crystallization)방법을 이용하여 500 °C로 열처리시 폭이 ~1500 Å이며 길이가 수 μm인 결정상을 성장시킬 수 있었다[26,27,28]. 이 방법들을 이용하여 고효율, 저가격, 대면적의 태양전지 제작에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 G-7과제의 도움을 받았다.

참고 문헌

1. D.E. Carlson and C.R. Wronski, "Amorphous silicon solar cell", Appl. Phys. Lett. **28(11)**, 671 (1976)
2. S. Fujukake, H. Ohta, A. Asano, Y. Ichikawa and H. Sakai, "High quality a-SiO:H films and their application to a-Si solar cells", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **258**, 875 (1992)
3. W. Ma, C.C. Lim, T. Saida, H. Okamoto, Y. Hamakawa, "Microcrystalline silicon carbide-New useful material for improvement of solar cell performance", Solar Energy Materials and Solar Cells **34**, 401 (1994)
4. S. Tsuge, Y. Hishikawa, N. Nakamura, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kishi and Y. Kuwano, "Effect of the texture of transparent electrodes on the p-layer and V_{oc} of amorphous silicon solar cell", PVSEC-5, Kyoto, Japan, 261 (1990)
5. Y. Ashida, "Single-junction a-Si solar cells with over 13 % efficiency", PVSEC-7, Nagoya, Japan, 33 (1993)
6. S. Tsuda, "'p layers' for high efficiency amorphous silicon solar cells", PVSEC-5, Kyoto, Japan, 21 (1990)
7. T. Machida, A. Miyazawa, Y. Yokosawa, H. Nakaya, S. Tanaka, T. Nunoi, H. Kumada, M. Nurakami, T. Tomita, "Development of low cost production technologies for polycrystalline silicon solar cells", PVSEC-9, Miyazaki, Japan, 99 (1996)
8. Y. Inomata, K. Fukui and K. Shirasawa, "Surface texturing

- of large area multicrystalline silicon solar cells using reactive ion etching method", PVSEC-9, Miyazaki, Japan, 109 (1996)
9. H.S. Reehal, M.J. Thwattes and T.M. Bruton, "Thin film polycrystalline silicon solar cells prepared by plasma CVD", Phys. Stat. Sol.(a) **154**, 623 (1996)
 10. A. Nakajima, T. Suzuki, M. Yoshimi, K. Yamamoto, "Thickness dependence on the performances for below 10μ m thin film poly-Si solar cell fabricated by Low temperature processes", PVSEC-9, Miyazaki, Japan, 245 (1996)
 11. K. Yamamoto, M. Yoshimi, T. Suzuki, Y. Okamoto, Y. Tawada and A. Nakajima, "Thin film poly-Si solar cell with "STAR structure" on glass substrate fabricated at low temperature", 26th IEEE PVSC, Anaheim (1997)
 12. J. Meier, R. Flückiger, H. Keppner and A. Shah, "Complete microcrystalline p-i-n solar cell-Crystalline or amorphous cell behavior?", Appl. Phys. Lett. **65(7)**, 860 (1994)
 13. A. Shah, J. Meier, P. Torres, U. Kroll, N. Beck, N. Wyrsh and H. Keppner, "Recent progress on microcrystalline solar cell", 26 IEEE PVSC Annaheim (1997)
 14. K. Saitoh, N. Ishiguro, N. Yanagawa, H. Tanaka, M. Sadamoto, S. Fukuda, Y. Ashida, N. Fukuda, "Performance of p-i-n solar cells with Intrinsic μ c-Si:H layer", J. Non-Cryst. Solids **198-200**, 1093 (1996)
 15. M. Kaneiwa, S. Okamoto, I. Yamasaki, M. Nishida, T. Nammori, "Cell structures with low-high heterojunction of c-Si and μ c-Si:H under rear contact for improvement of efficiencies", Solar Energy Materials and Solar Cells **34**, 183 (1994)
 16. J.H. Werner, S. Kolodinski, U. Rau J.K. Arch, and E. Bauser, "Silicon solar cell of 16.8μ m thickness and 14.7 % efficiency", Appl. Phys. Lett. **62(23)**, 2998 (1993)
 17. G.F. Zheng, W. Zhang, Z. Shi, M. Gross, A. B. Sproul, S. R. Wenham, M. A. Green, "16.4 % efficient, thin active layer silicon solar cell grown by liquid phase epitaxy", Solar Energy Materials and Solar Cells **40**, 231 (1996)
 18. T. Matsuyama, N. Terada, T. Baba, T. Sawada, S. Tsuge, K. Wakisaka, S. Tsuda, "High-quality polycrystalline silicon thin film prepared by a solid phase crystallization method", J. Non-Cryst. Solids **198-200**, 940 (1996)
 19. S. Arimoto, H. Morikawa, M. Deguchi, Y. Kawama, Y. Matsuno, T. Ishihara, H. Kumabe, T. Murotani and S. Mitsui, "A novel thin film polycrystalline silicon solar cell with high-efficiency over 14 % based on SOI structure prepared by Zone-Melting Recrystallization", PVSEC-7, Nagoya, 103 (1993)
 20. K. Yamamoto, A. Nakashima, T. Suzuki, M. Yoshimi, H. Nishio and M. Izumina, "Thin-film polycrystalline Si solar cell on glass substrate fabricated by a novel low temperature process", J. Jpn. Appl. Phys. **33**, L1751 (1994)
 21. J.K. Rath, H. Meiling and R.E.I. Schropp, "Purely intrinsic poly-silicon films for n-i-p Solar Cells", J. Jpn. Appl. Phys. **36**, 5436 (1997)
 22. A. Rohatgi and S. Narashima, "Design, fabrication, and analysis of greater than 18 % efficient multicrystalline silicon cells", PVSEC-9, Miyazaki, Japan, 85 (1996)
 23. Y. Ichikawa, "Fabrication technology for large-area a-Si solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells **34**, 321 (1994)
 24. J. Yang, A. Banerjee, T. Glatfelter, S. Sugiyama and S. Guha, "Recent progress in amorphous silicon alloy leading to 13 % stable cell efficiency", 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997
 25. W. Ma, T. Horiuchi, C.C. Lim, H. Okamoto, Y. Hamakawa, "Optimum design and its experimental approach of a-Si//poly-Si tandem solar cell", Solar Energy Materials and Solar Cells **32**, 351 (1994)
 26. S.Y. Yoon, K.H. Kim, C.O. Kim, J.Y. Oh, and J. Jang, "Low temperature metal induced crystallization of amorphous silicon using a Ni solution", J. Appl. Phys. **82**, 5865 (1997)
 27. S.Y. Yoon, J.Y. Oh, C.O. Kim and J. Jang, "Low temperature solid phase crystallization of amorphous silicon using (Ni+Au) solution", Solid State Commun. **106(6)**, 325 (1998)
 28. S.Y. Yoon, J.Y. Oh, C.O. Kim and J. Jang, "Low temperature Solid phase crystallization of amorphous silicon at 380 °C", J. Appl. Phys. To be published.