

수소화된 비정질 실리콘  $n^+p-p^+$  태양전지에서 최적기판온도의 결정

이 이상                      장    진  
 경희 대학교 물리학과 및 기초 과학 연구소

Optimum Substrate Temperature for Hydrogenated Amorphous Silicon  $n^+p-p^+$  Cells

Yi Sang Lee                      Jin Jang  
 Dept. of Physics & Research Inst. for  
 Basic Sciences, Kyung Hee University

Abstract

We report that the optimum substrate temperature to fabricate a-Si:H  $n^+p-p^+$  cell decreases with increasing the boron concentration in the p-layer. The results can be explained as the dependence of substrate temperature for the relaxation of silicon atoms and the bonded hydrogen concentration in the p-layer.

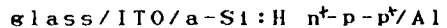
다. 현재까지는 1층에 수 ppm 정도의 보론을 도핑하여 내부 전기장이 1층 전체에 균일하도록 하여 변환효율을 증가시켰다(1). 그러나 비정질 실리콘에 보론이 도핑되면 국제상태밀도의 최소가 되는 기판 온도가 undoped 시료에 비해 낮은 쪽으로 이동되는 경향이 있다.(2,3). 본 연구에서는  $n^+p-p^+$ 형 태양전지를 p층에 각기 다른양의 보론을 도핑하여 100°C에서 제작하였으며 아닐링 온도에 따른 폐회로 전류밀도(short circuit current density:  $J_{sc}$ ), 개회로 전압(open circuit voltage:  $V_{oc}$ ), 충실도(fill factor: FF), 변환 효율(conversion efficiency)을 조사하여 보론 도핑 비율에 따른 최적 기판온도를 결정하였다.

1. 서 론

수소화된 비정질 실리콘(a-Si:H)은 결정질 실리콘(c-Si)에 비해 광전기 전도도와 광흡수율이 크며 유리, 세라믹, stainless steel 등의 기판위에 저온(250°C)에서 증착이 가능하다. 그러므로 비정질 실리콘 태양전지는 가격이 저렴하고, 대면적으로 제작이 가능하다. 그러나 비정질 실리콘은 전하운반자의 확산거리가 짧기 때문에 대부분의 광전류는 depletion 영역에서의 이동전류(drift current)에 기인한다. 기존의 태양전지는 p-i-n과 n-i-p 형태이며 기판 온도가 250°C에서 최적이다. 기판온도가 250°C 이하 일 경우 1층에 defect density가 증가된

2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 a-Si:H  $n^+p-p^+$ 형 태양전지는 plasma-CVD 방법으로 제작하였다. 판저항이 20ohms/square 인 ITO(Indium Tin Oxide)가 증착된 유리를 기판으로 사용하였다. 태양전지의 구조는



이며, Al전극은 고진공중( $\sim 10^{-5}$  Torr)에서 증착하였다. 이때 p층은  $B_2H_6/SiH_4$ 의 비율이 0,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-3}$  그리고  $3 \times 10^{-3}$ 인 혼합된 가스를 사용하였다. 이때 제작조건은 표1과 같다.

Illumination하의 J-V측정은 GE사의 250W ENH lamp 3개로 구성된 solar simulator를 이용했다. 입사광의 세기는 Weathertonic사의 silicon solar cell py

This work was supported by KOS EF

ranometer (Model 3120)를 사용하여 AM 1 (Air Mass 1 : 100mW/cm<sup>2</sup>)이 되도록 했다. 입사광의 spectrum이 태양광과 유사하도록 Oriel사의 변환필터를 사용하였다. 아닐링은 확산펌프를 사용한 고진공 (~10<sup>-5</sup> Torr) 하에서 30분간 하였고, J-V 측정은 상온에서 컴퓨터로 계산하였다. 이때 온도측정은 Cu-Constantan 열전대를 사용하였다. 암상태에서의 J-V는 electrometer를 컴퓨터에 연결하여 bias 전압을 -1.4V에서 +1.4V까지 0.05V씩 증가시키면서 측정하였다. 온도에 따른 암전류 측정은 20°C 부터 90°C까지 10°C 간격으로 측정하였다.

표 1: 비정질 실리콘 n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> 태양전지 제작조건  
Preparation condition of a -Si:H n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> solar cells

기판온도	100 °C	gas pressure	1 Torr
전극직경	12cm	gas flow rate	10SCCM
증착속도	0.6Å/s	rf power	5 W

3. 결과 및 논의

그림 1은 p층에 보론의 도핑 함량이 각기 다른 n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>형 태양전지의 아닐링온도에 따른 제피로 전류밀도 (J<sub>sc</sub>)를 나타낸 것이다. 낮은 온도에서는 (Si-H)n의 polymer chain, 수소 cluster 또는 microvoid 와 같은 미세구조적인 결함이 생기고 weak Si-H bond 에 의한 dangling bond 가 많이 생겨 film의 결함밀도가 높다. 이런 결함은 일정온도까지 아닐링하면 줄어들어 film의 질이 좋아진다. 그러나 아닐링온도가 더 높아지면 Si-H 결

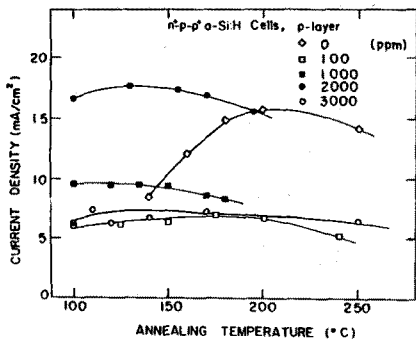


그림 1. p층에 보론함량이 다른 n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> 태양전지의 아닐링 온도에 따른 제피로전류밀도

합을 이루는 H의 양이 감소하여 밴드갭 내에 dangling bond(D<sup>0</sup>)가 생겨 전자나 양공을 포획하는 재결합중심을 이룬다. 그러므로 재결합수명(τ<sub>r</sub>)이 감소하여 전류밀도가 감소한다. 이런 현상은 그림 1에서 알 수 있듯이 p층에 보론이 2000ppm 도핑했을 경우 아닐링 온도에 가장 민감하게 반응하며 아닐링온도가 130°C인 경우에 가장 큰 전류밀도 값을 갖는다. Undoped a-Si:H에서는 D<sub>3</sub><sup>+</sup>, D<sub>3</sub><sup>-</sup>, D<sub>2</sub><sup>-</sup>의 dangling bond가 있다. 여기에 보론을 도핑하면 D<sub>3</sub><sup>+</sup> + B<sub>4</sub><sup>-</sup> → D<sub>3</sub><sup>+</sup> + B<sub>4</sub><sup>-</sup> 이 되어 D<sup>0</sup>의 수가 줄어든다. 또한 다수전하운반자의 재결합수명(τ<sub>r</sub>)이 커진다. 그 결과 전하운반자의 trap이 줄어들어 전류밀도(J<sub>sc</sub>)가 증가한다. 그러나 2000ppm 보다 많이 도핑하면 보론에 의한 defect states 수가 증가하여 공간전하밀도가 증가하고 재결합수명이 작아져 전류밀도가 작아진다.

그림 2 는 아닐링온도에 따른 개회로전압 (V<sub>oc</sub>)을 나타낸 것이다. 개회로전압이 크기 위해서는 built-in potential이 커야한다. 아닐링온도에 따라 V<sub>oc</sub>의 변화는 작으나 고온으로 가면 감소한다. 고온에서

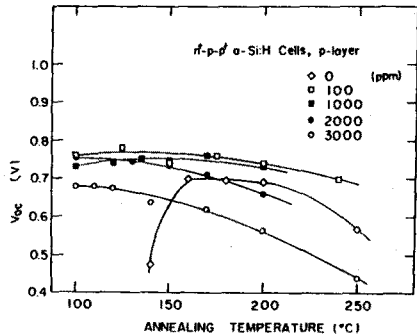


그림 2. p층에 보론함량이 다른 n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> 태양전지의 아닐링 온도에 따른 개회로전압

V<sub>oc</sub>가 감소하는 이유는 수소가 감소하여 공학적 갭이 감소하고 defect density가 증가되어 recombination current가 증가되기 때문이다. 도핑이 안된 경우와 많이된 경우는 고온에서 V<sub>oc</sub>의 감소가 급격하다.

그림 3은 아닐링온도에 따른 충실도 (FF)를 나타낸 것이다. 아닐링온도에 따라 증가하다, 일정 온도에서 다시 감소한다. 저온에서는 수소의 양이 많아 밴드갭이 크고 전기전도도가 작기때문에 직렬저항 (series resistance)이 크다. 또한 고온에서는 Si-H 결합을 이루는 H가 방출 됨으로써 금지대 상태밀도가 증가한다.

그러므로 제결함수명이 감소하여, 결과적으로  $\mu\tau$ 가 감소하여 충실도가 감소한다. 충실도는 시료의 직렬저항에 가장 큰 영향을 받기 때문에 도핑함량이 증가함에 따라 증가되어 3000ppm인 시료의 경우에 51.9%로 가장 크게 측정되었다.

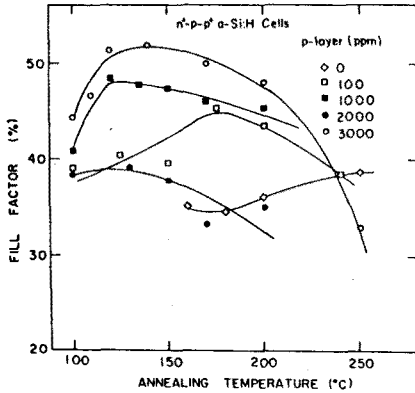


그림 3. p층에 보른함량이 다른  $n^+-p-p^+$  태양전지의 어닐링 온도에 따른 충실도

그림 4는 어닐링 온도에 따른 변환효율을 나타낸 것이다. 도핑함량이 많을수록 효율의 최대점은 상대적으로 낮은온도 쪽으로 이동한다. 이것은 시료제작시 보른도핑량이 증가하면 최소극대상태밀도를 이루는 온도가 저온 쪽으로 이동하기 때문이다. 2000ppm 도핑된 시료가 변환효율이 5.12%로 가장 크다.

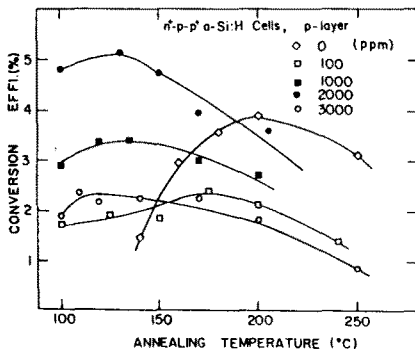


그림 4. p층에 보른함량이 다른  $n^+-p-p^+$  태양전지의 어닐링 온도에 따른 변환효율

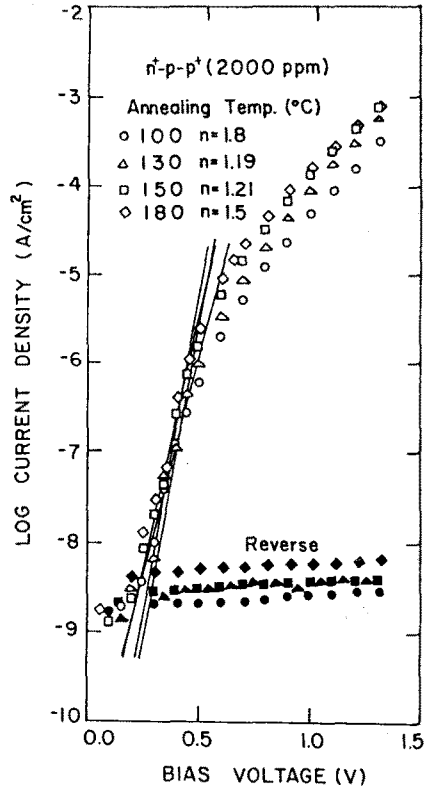


그림 5. p층에 보른 2000ppm도핑된  $n^+-p-p^+$  태양전지의 어닐링 온도에 따른 암 전류-전압

그림 5는 보른이 2000ppm 도핑된 diode의 dark  $J-V$ 를 어닐링 온도에 따라 측정된 것이다. 어닐링 온도가 증가하면 수소량이 감소하여 저항이 감소한다. 그러므로 암전류밀도가 증가한다. 암전류는  $J = J_0(\exp(qV/nkT) - 1)$ 로 주어지며  $n$ 은 diode quality factor이다. 어닐링 온도가 100°C일때는 defect에 의한 tunneling이 많기 때문에  $n$  값이 1.8이고 130°C 어닐링 하면 defect가 감소하여  $n$  값이 1.19이다. 그러나 어닐링 온도가 증가하면 수소의 방출에 의해 defect density가 다시 증가하여 tunneling에 의한 전류가 주된 역할을 하며  $n$  값이 증가한다. 역방향과 순방향전류의 비는 1 volt에서  $\sim 10^5$ 으로 어닐링 온도에 관계없이 거의 일정하다.

그림 6은 p층의 보른 도핑함량에 따른 최적 온도를 나타낸 것이다. 보른함량이 증가 할수록 최적 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

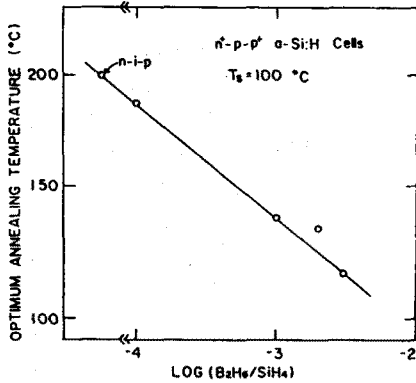


그림 6. n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> 태양전지의 p층 보론 도핑 함량에 따른 기판의 최적온도

#### 4. 결 론

n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> 형 태양전지에서 p층의 보론 함량에 따른 최적 기판온도를 구했다. 최적 기판온도보다 낮은 경우는 (Si-H)n의 polymer, 수소의 cluster, microvoid와 같은 defect들이 생겨 효율이 낮아지고 최적온도보다 높아 질때는 Si-H결합을 이루고 있는 H가 방출됨으로써 극대삼배율도가 증가하고 갭이 감소하여 효율이 줄어든다. 또한 최적온도는 p층의 보론함량에 따라 달라지며 보론함량이 클 수록 낮은 온도쪽으로 이동하는데 이것은 수소의 diffusion coefficient가 보론의 증가량에 따라 증가되기 때문이다.

2000ppm도핑된 태양전지의 암 전류-전압특성에서 1 30°C 에서 아닐링 했을경우 diode quality factor가 1.19로써 가장 좋다.

#### 참고 문헌

- (1) F.R. Jeffrey and G.D. Vernstrom, "Effects of boron profiles on the open circuit voltage of p-i-n & n-i-p amorphous silicon solar cells", Appl.Phys.Lett 48(22), 1538, 1986
- (2) Jin Jang, Sung Chul Kim, Dae Bong Lee & Choochon Lee "Characterization of heavily boron-doped a-Si:H film deposited at low substrate temperature", Proc. MRS 1987 Spring meeting
- (3) 이 대봉, 온 여진, 장 진, "p층을 저온에서 증착한 비정질 실리콘 n-i-p형 태양전지의 특성연구" 대한 전자공학회 추계학술대회 논문집 Vol.9, No.2, P494(1986)