

비정질 실리콘 n⁺-p-p⁺ 태양전지의 특성 연구

이 이상^o 김 재봉 이 영근 추 혜용 장 진

경희대학교 물리학과 및 기초과학 연구소

Characterization of Amorphous Silicon
n⁺-p-p⁺ Solar Cells

Yi Sang Lee, Jae Boong Kim, Young Keun Lee, Hye Yong Chu and Jin Jang
Dept. of Physics & Research Inst. for Basic Science,

Kyung Hee University

ABSTRACT

The photovoltaic performances of a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells have been investigated. The optimum substrate temperature for the deposition of a-Si:H n⁺-p-p⁺ cell decreases with increasing doping concentration of the p-layer, and is less than 200°C when the gas phase doping concentration is higher than 10 ppm. The results can be explained as the dependences of substrate temperature for the relaxation of silicon atoms and for the bonded hydrogen concentration in the p-layer.

I. 서론

수소화된 비정질 실리콘(a-Si:H)은 제작이 용이하고 가격이 저렴하여 여러가지 소자로 응용할 수 있다. 현재, 비정질 실리콘 태양전지는 부분적으로 실용화되었으며, 효율을 높이기 위한 연구가 계속 진행중이다. 가장 일반적인 태양전지의 구조는 p-i-n 및 n-i-p 구조이며, 내부 전기장을 i층에 균일하게 해주기 위해 경계면에 graded 도핑을 하거나(1), i층에 수 ppm의 보론을 도핑하여(2) 변환효율을 증가시키는 연구가 진행중이다. 이 중에서 i층에 보론을 도핑하면 겹내의 상태밀도가 최소가 되는 기판온도가 undoped 시료에 비해

낮은 쪽으로 이동하는 경향이 있다(3). 그러므로 i층에 각기 다른 양의 보론을 도핑하여 n⁺-p-p⁺ 구조를 갖는 태양전지를 저온에서 증착하여 어닐링 온도에 따른 개회로 전압(open circuit voltage; Voc), 폐회로 전류밀도(short circuit current density; Jsc), 충실도(fill factor; FF), 변환효율(conversion efficiency)을 측정하여 보론 도핑함량에 따른 최적 기판온도를 결정하였다.

II. 실험 방법

본 실험에서 사용한 a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지는 판 저항이 20 ohm/square인 SnO₂(tin-oxide)가 증착된 유리를 기판으로 사용하여 plasma-CVD 방법으로 제작하였다.

먼저, n⁺ 층은 1.0 vol.%의 PH₃가 혼합된 SiH₄ 가스를 사용하여 120 Å의 두께로 증착한 뒤, B₂H₆/SiH₄의 부피 비율이 0 - 100 ppm인 가스를 사용하여 p층을 4000 Å 두께로 증착하였다. 이때, p층에 보론이 100 ppm 도핑된 태양전지는 120°C에서 제작하였으며 다른 시료는 150°C에서 제작하였다. 그리고 1% 보론이 도핑된 p⁺ 층은 250 Å의 두께로 증착하였다. 그의 다른 제작조건은 표 1과 같다. 전극은 p⁺ 층위에 Al을 진공중(-10⁻⁵ Torr)에서 thermal evaporation 방법으로 증착하였다. 그리하여 완성된 a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 구조는 그림 1과 같다.

어닐링은 확산 펌프를 사용한 진공(-10⁻⁵ Torr)에서 30분간 하였고, solar simulator하에서 광전류-전압 특성을 측정하였다. 이때, 입사광의 세기는 AM-1 (Air Mass 1: 100 mW/cm²)으로 하였다.

* 본 연구는 한국 과학 재단의 지원을 받았음.

표 1 : 비정질 실리콘 n⁺-p-p⁺ 태양전지의 제작조건

Table I : Preparation conditions of a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells.

gas pressure	1 Torr	전극직경	12 cm
gas flow rate	10 sccm	증착속도	0.6 Å/s
rf power	5 W		

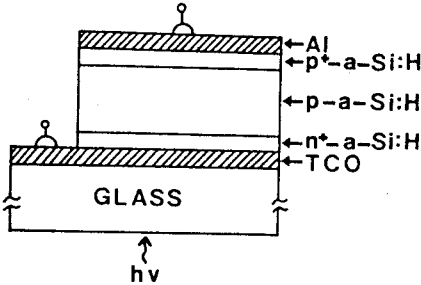


그림 1. a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 단면구조

Fig.1. Schematic structure of the a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cell.

III. 결과 및 논의

그림 2는 p층에 보론의 도핑 함량이 각기 다른 a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 어닐링 온도에 따른 폐회로 전류밀도 (Jsc)를 나타낸 것이다. 낮은 온도에서는 비정질 실리콘 박막내에 weak Si-H bond에 의한 dangling bond 가 많이 생겨 박막의 결합 밀도가 높다. 이러한 결합은 일정한 온도까지 어닐링을 하면 줄어들어 전류밀도가 증가한다. 그러나 어닐링 온도가 더 높아지면 Si-H 결합을 이루고 있는 수소의 양이 감소하여 밴드 갭내에 dangling bond 가 다시 증가하므로 전류밀도가 감소한다. p층의 보론 함량이 증가하면 전류밀도의 최대값에 해당하는 어닐링 온도가 낮은 온도 쪽으로 이동한다.

그림 3은 어닐링 온도에 따른 개회로 전압(Voc)을 나타낸 것이다. Voc의 어닐링 온도 의존성은 폐회로 전류밀도와 유사하다. 어닐링 온도가 증가하면 Voc는 일정한 값까지 증가하다, 더 높은 온도에서는 다시 감소한다. a-Si:H 갭내의 상태밀도(density of states)에 대한 어닐링 효과는 기판 온도 의존성과 유사하여, 어닐링 온도가 증가하면 갭

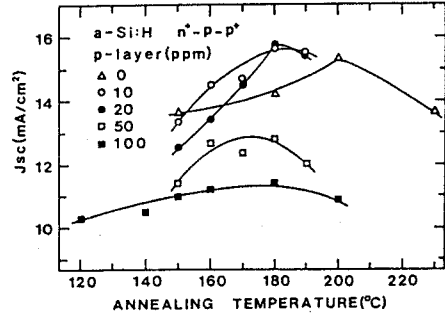


그림 2. a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 어닐링 온도에 따른 폐회로 전류밀도(Jsc)

Fig.2. Short circuit current density(Jsc) plotted against annealing temperature for a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells.

내의 상태밀도가 감소하여 Voc 가 증가한다. 그러나 고온에서는 어닐링 온도가 증가함에 따라 Voc 가 감소하는 데, 이는 수소의 양이 감소하여 결합밀도가 증가하고 밴드 갭이 감소하기 때문이다.

그림 4는 a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 충실도(FF)에 대한 어닐링 효과를 나타낸 것이다. 충실도에 대한 어닐링 효과는 Voc나 Jsc와 유사하여 어닐링 온도에 따라 증가하다, 일정한 온도 이상에서 다시 감소한다. 고온에서 어닐링을 하면 dangling bond의 증가로 재결합수명(τ_r)이 감소한다. 결과적으로 이동도와 재결합 수명의 곱(μτ_r)이 감소하므로 충실도가 감소한다(4). p층의 도핑 농도가 증가하면 갭내의 상태밀도에 대한 어닐링 효과 때문에 충실도의 최대점이 낮은 온도 쪽

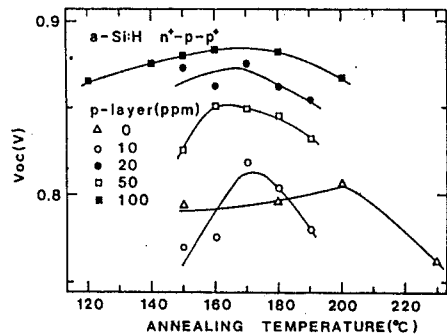


그림 3. a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 어닐링 온도(T_A)에 따른 개회로 전압(Voc)

Fig.3. Open circuit voltage (Voc) of a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells against annealing temperature(T_A).

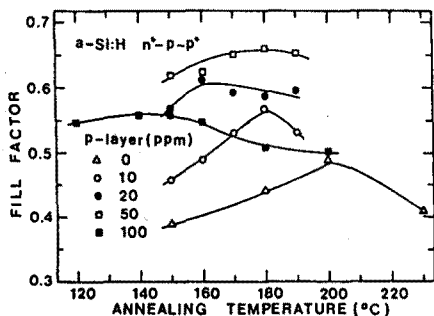


그림 4. a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 어닐링 온도에 따른 충실도

Fig.4. Fill factor plotted against annealing temperature for a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells.

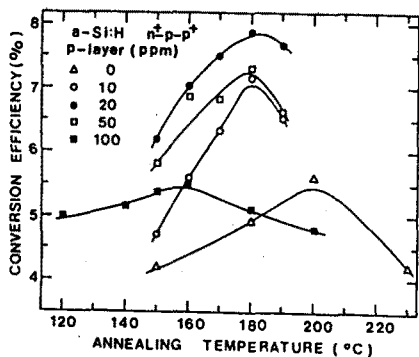


그림 5. a-Si:H n⁺-p-p⁺ 태양전지의 어닐링 온도에 따른 변환효율

Fig.5. Conversion efficiency of a-Si:H n⁺-p-p⁺ solar cells against annealing temperature.

으로 이동한다.

그림 5는 어닐링 온도에 따른 변환효율을 나타낸 것이다. a-Si:H p-i-n과 n-i-p 형 태양전지의 최적 기판온도는 250 °C로 알려져 있다. 이와달리, 그림 5에서 보듯이 a-Si:H n⁺-p-p⁺ 형 태양전지 변환효율의 최대점에 해당하는 어닐링 온도가 200 °C 보다 낮은 온도임을 알 수 있다.

그림 6은 a-Si:H n-i-p 태양전지와 p층의 보론 함량이 100 ppm인 n⁺-p-p⁺ 태양전지의 분광감도(spectral response)를 나타낸 것이다. 장파장 영역에서의 전자 수집율(carrier collection efficiency)은 거의 같으나 단파장 영역에서는 n⁺-p-p⁺가 n-i-p 보다 크게 나타났다. 이것은 n⁺-p 계면에서의 내부 전기장 및 전위차가

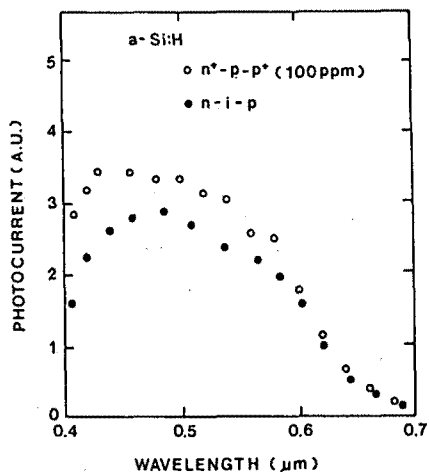


그림 6. a-Si:H n-i-p형과 n⁺-p-p⁺형 태양전지의 분광감도

Fig.6. Spectral response of a-Si:H n-i-p and n⁺-p-p⁺ solar cells.

n-i 계면에서 보다 크기 때문에 전자 수집율이 증가하며, 또한 양공이 n층으로 확산(back diffusion)하는 것을 막아주기 때문이다.

a-Si:H n⁺-p-p⁺ 형 태양전지의 최적 기판온도가 낮고, 또한 p층의 도핑 함량이 증가함에 따라 감소하는 원인은 다음과 같다.

저온의 기판온도에서 증착한 비정질 실리콘 박막은 구조적으로 높은 에너지 상태로 남게되어 weak Si-H bond에 의한 dangling bond 의 밀도가 높게된다. 그러나 기판온도 이상의 높은 온도에서 어닐링을 하면 구조적으로 자유에너지가 최소값을 갖는 준안정 상태에 이르게된다. 이러한 어닐링 과정은 defect와 dangling bond를 감소시키고, strain을 없애주며, 안정된 결합을 이루도록 구조가 재형성되어 겹내의 상태밀도를 감소시킨다. 그러나 그보다 더 높은 온도에서는 수소가 방출되므로 비정질의 그물구조가 깨어져 dangling bond 가 생긴다. 이 dangling bond는 전자나 양공을 포획하는 재결합 중심을 이루게 되어 재결합수명(τ_a)이 감소하게된다. 그리고 undoped a-Si:H 에 비해 보론이 도핑된 a-Si:H은 낮은 온도에서도 수소가 방출된다. 결과적으로 a-Si:H n-i-p형 태양전지의 최적 기판온도는 250 °C 인데 비해 i층에 보론의 도핑 함량이 10 ppm 이상일 경우는 최적 기판온도(혹은, 어닐링 온도)가 200 °C 보다 낮은 온도로 이동

하게 된다. 이러한 $n^+ - p - p^+$ a-Si:H 태양전지에서는 빛 조사에 의하여 효율이 증가되는 현상이 나타나는데(5), 이는 빛 조사시에 p층의 도핑 효율이 증가되기 때문이다(6).

IV. 결론

p층의 보론 함량이 각기 다른 a-Si:H $n^+ - p - p^+$ 태양전지의 광기전력 특성을 조사한 결과, 기판온도가 최적 기판온도보다 낮은 경우는 구조적으로 많은 defect들이 생겨 효율이 낮게 되고, 최적 기판온도보다 높은 경우는 Si-H결합을 이루고 있는 수소의 방출로 인해 갭내의 상태밀도가 증가하고 갭이 감소하여 효율이 줄어든다. 그리고 a-Si:H p-i-n과 n-i-p형 태양전지와 비교해 볼때 i층에 보론이 도핑된 경우는 낮은 온도에서도 수소가 방출되므로 보론 함량이 증가함에 따라 최적 기판온도가 200°C이하의 낮은 온도 쪽으로 이동함을 알 수 있다.

참고문헌

1. R.R. Arya, A. Catalano, and R.S. Oswald, "Amorphous silicon p-i-n solar cells with graded interface", Appl. Phys. Lett. 49(17), pp. 1089-1091, 1986.
2. F.R. Jeffrey and G.D. Verntom, "Effect of boron profiles on the open circuit voltage of p-i-n & n-i-p amorphous silicon solar cells", Appl. Phys. Lett. 48(22), pp. 1538-1540, 1986.
3. 이 이상, 장진, "수소화된 비정질 실리콘 $n^+ - p - p^+$ 태양 전지에서 최적 기판온도의 결정", 전기, 전자공학 학술 대회 논문집(1), pp. 509-512, 1987.
4. B.W. Faughnan and R.S. Crandall, "Determination of carrier collection length and prediction of fill factor in amorphous silicon solar cells", Appl. Phys. Lett. 44(5), pp. 537-539, 1984.
5. J. Jang and Y.S. Lee, "Effect of boron incorporation on the light-induced eff-

- ect in amorphous silicon solar cells", Appl. Phys. Lett. April(1988), in press.
6. J. Jang, S.C. Park, S.C. Kim and C. Lee, "Increase of doping efficiency by light soaking in boron-doped hydrogenated amorphous silicon", Appl. Phys. Lett. 51, pp. 1804-1806, 1987.