

## 비정질실리콘 pin태양전지에서 입사광

## 세기에 따른 전류 전압특성

## (Incident Light Intensity Dependences of Current Voltage Characteristics for Amorphous Silicon pin Solar Cells)

張 震\*, 朴 敏\*

(Jin Jang and Min Park)

## 要 約

글로우 방전 방법에 의하여 효율 약 7.1%의 비정질 실리콘 pin 태양전지를 제작하여 입사된 빛의 세기에 따른 전류-전압 특성을 연구하였다. 케회로 전류밀도는 빛의 세기(I)의 0.91승에 비례하고 개회로 전압은 낮은 빛 세기에서는  $\ln I$ 에 비례하나 AM1 이상에서는 점차로 포화된다. 충전도는 빛의 세기 증가에 따라 증가되나 면적이 큰 시료에서는 AM1 이상에서 기관 ITO의 저항 때문에 감소된다. AM1 이상의 빛을 장시간 태양전지에 비추면 직렬 저항이 증가되고 분류저항이 감소되어 변환 효율이 감소되는데 특히 낮은 빛의 세기에서 큰 효과가 나타난다. 케회로 상태에서 pin 태양전지에 걸린 전압은 빛의 세기에는 무관하나 온도가 증가되면 감소되고 빛을 장시간 비추 후에는 증가된다.

## Abstract

The dependence of the current-voltage characteristics of hydrogenated amorphous silicon pin solar cells on the illumination light intensity has been investigated. The open circuit voltage increases linearly with increasing the logarithm of light intensity up to AM 1, and nearly saturates above AM 1, indicating the open circuit voltage approaching the built-in potential of the pin solar cell above AM 1. The short circuit current density increases with light intensity in proportion to  $I^{0.85}$  before and  $I^{0.97}$  after light exposure. Since the series resistance decreases and shunt resistance increases with light intensity, the fill factor increases with light illumination. To increase the fill factor at high illumination in large area solar cells, the grid pattern on the ITO substrates should be made. Long light exposure on the solar cells gives rise to the increase of bulk resistance and defect states, resulting in the decrease of the fill factor and short circuit current density. The potential drop in the bulk of the a-Si:H pin solar cells at short circuit condition increases with decreasing temperature, and increases after long light exposure.

\*正會員, 慶熙大學校 基礎科學研究所 및 物理學科

(Inst. for Basic sciences and Dept. of physics, Kyung Hee Univ.)

(\*본 연구는 문교부 학술지원 조성비의 도움을 받았음.)

接受日字: 1985年 9月 20日

## I. 序 論

1976년 영국의 Spear 등이 글로우방전에 의하여 분해된 수소화된 비정질 실리콘(a-Si:H)으로 pn 접합을 제작하는데<sup>1)</sup> 성공한 후 a-Si:H 태양전지 분야에 끊임없이 연구가 진행되고 있다.

비정질 실리콘은 가시영역에서 결정질 규소에 비해 약 10배의 광흡수율,<sup>[2]</sup> 1.6-1.8eV의 광학적 갭(gap)<sup>[2]</sup>, AMI에서  $10^{-3}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  정도의 높은 광전기 전도도,<sup>[3]</sup> 집합의 용이성 및 300°C 이하에서 금속, ceramics, 유리, kapton 기판위에 증착이 가능하기 때문에 박막 태양전지 제작에 적합한 반도체 재료이다.<sup>[4]</sup>

비정질 실리콘은 금지대 상태밀도가 높아 전하 캐리어의 확산 거리가 짧기(1 $\mu\text{m}$ 이하) 때문에 태양전지에서 대부분의 광전류는 depletion층(layer)에서 생긴 이동(drift)전류에 기인된다.<sup>[5]</sup> 따라서, depletion층의 두께를 증가시켜야 변환 효율이 증가됨으로 국재상태 밀도가 낮은 재료로 태양전지를 제작해야 높은 효율의 태양전지를 제작할 수 있다. 비정질 실리콘 태양전지에서 depletion층을 넓게 하는 데는 pin 혹은 nip 형이 가장 적합하다.

그런데, pin형 태양전지에서 p층에 흡수된 빛은 대부분 광전류에 기여하지 않음으로 p-a-Si:H 대신에 광학적 갭이 2.0eV 정도인 탄소 실리콘 합금 비정질 반도체(a-SiC:H)에 보론(B)을 도핑(doping)하여 사용하면 p층에서의 광흡수를 줄이고 built-in potential을 증가시키기 때문에 캐화로 전류밀도(Jsc) 및 개회로 전압(Voc)이 증가된다.<sup>[6]</sup> 다중실(separated reaction chamber)에서 증착한 1cm<sup>2</sup> 크기의 a-Si:H pin태양전지의 최고효율은 1985년 6월 현재 11.5%이다.<sup>[7]</sup>

본 논문에서는 효율이 약 7.1%인 비정질 실리콘 pin형 태양전지를 제작하여 태양전지의 전류-전압특성이 입사된 빛의 세기에 따라서 변화되는 현상을 연구하였다. 측정 결과로부터 직렬(series) 저항, 분류(shunt) 저항, 변환 효율, 충실도(fill factor: FF), 개회로 전압(Voc), 캐화로 전류밀도(Jsc) 등이 입사된 빛의 세기에 따라 변화되는 것을 조사하고 빛을 장시간 비추면 전기전도도가 감소되는 Staebler-Wronski 효과<sup>[8]</sup>가 pin 태양전지의 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 사용된 pin형 태양전지의 구조는 유리/ITO/a-Si:H pin/Al로 이미 발표된 바와 같고,<sup>[9,10]</sup> 태양전지의 증착 조건은 표 1에 자세히 나타나 있다. 모든 가스는 혼합한 후에 micro-needle bellow valve를 사용하여 거의 일정한 속도로 반응실로 주입시켰다. P와 i층 제작 사이에 5N의 수소를 20분 흘려보내 탄소 및 보론이 i층에 포함되는 것을 줄였다. 기판으로는 20 $\Omega$ /square인 ITO가 증착된 유리를 사용하였다. 가스, 진공 밸브(valve), 진공 pump 및 진공 게이지

표 1. 비정질 실리콘 pin 태양전지의 제작 조건  
Table 1. Deposition conditions for a-Si:H pin solar cells.

Gas pressure	0.8 torr
Discharging power density	30 mW/cm <sup>2</sup>
Deposition rate	~1.2 $\text{\AA}$ /sec
Gas flow rate	~10scm
P layer thickness	~100 $\text{\AA}$
i layer thickness	4000 $\text{\AA}$
N layer thickness	500 $\text{\AA}$
Gas (i layer)	20 vol. % SiH <sub>4</sub> in H <sub>2</sub>
Gas (p layer)	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> :SiH <sub>4</sub> :CH <sub>4</sub> =0.01:1:2
Gas (n layer)	1 vol. % PH <sub>3</sub> in SiH <sub>4</sub>

(gauge)를 제외한 모든 글로우 방전장치는 실험실에서 제작된 것이다.

태양전지 측정시 광원은 General Electric사의 250W ENH등 (lamp) 3 개를 사용하였다. 빛의 스펙트럼이 태양광에 유사하도록 변환 필터(3000°C의 black body radiation 스펙트럼을 6000°C로 변화시킴)를 사용하였다. 필터를 통과한 빛의 스펙트럼은 측정하지 않았으나 빛의 세기에 따른 실험을 할 때는 큰 문제가 없다고 생각된다.

태양전지의 효율은 실제의 태양광 하에서 측정하였다. 빛의 세기 변화는 neutral density 필터를 사용하였고 빛의 세기는 Weathertronics사의 Pyranometer 3120을 사용하여 측정하였다.

Annealed state는 175°C에서 30분 annealing한 직후에 측정되었다. Light soaking 효과가 175°C에서 30분 annealing 하면 완전히 제거됨을 관측하였다. 직렬 저항은 J-V 특성의 Voc에서의 기울기에서, 분류저항은 V=0에서의 기울기에서 구한 것이다.

III. 결과 및 논의

제작된 시료의 P, I, N 층에서의 암전기전도도는 두께가 1 $\mu\text{m}$ 인 경우 각각 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-8</sup>, 10<sup>-2</sup>,  $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  정도로 측정되었다.<sup>[11,12]</sup>

제작된 대표적인 태양전지의 특성이 그림 1에 나타나 있다. 태양전지의 특성 측정시 입사된 태양광의 세기는 33.6mW/cm<sup>2</sup>이다. 그림에서 Jsc는 4.47mA/cm<sup>2</sup>, Voc는 0.83V, FF는 64.7%이고 변환 효율은 7.1%이다. 단일실(single chamber)에서 제작한 pin형 태

양전지의 세계최고 효율은 8% 정도이므로<sup>11)</sup> 본 연구에서 사용된 태양전지의 효율은 좋은 편이다. 본 태양전지 제작시에 평평한 기판과 전극으로 Al을 사용하였으므로, textured 기판과 Ag전극을 사용하면 8% 이상의 효율이 얻어질 것으로 예상된다.

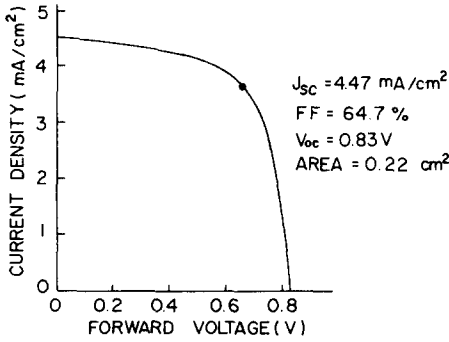


그림 1. 제작된 비정질 실리콘 p(a-SiC:H) in (a-Si:H) 태양전지의 33.6mW/cm<sup>2</sup>의 태양광 아래서 측정된 전류-전압 특성

Fig. 1. Illuminated J-V Characteristics for p(a-SiC:H) in (a-Si:H) solar cell under 33.6 mW/cm<sup>2</sup> sunlight.

그림 2는 입사된 빛의 세기에 따라서 측정된 Jsc를 나타낸다. 그림의 횡축에 표시된 1은 170mW/cm<sup>2</sup>에 해당된다. Log-log 그래프상에서 측정온도에 관계없이 직선을 이룬다. 즉, Jsc=KI<sup>r</sup>의 관계를 만족한다. 식에서 K는 상수, I는 빛의 세기이고 r는 log-log 그래프상에서 직선의 기울기를 나타낸다. 측정온도에 관계없이 r는 0.91이다.

결정질 실리콘 태양전지에서는 Jsc가 확산전류(diffusion current)에 기인되기 때문에 I에 비례된다. 그러나, 비정질 실리콘 태양전지에서는 Jsc가 이동전류에 기인되는데 빛의 세기에 따라서 준 페르미 준위(quasi-Fermi level)가 변화되어 pi 및 in 경계면부터 생기는 depletion 층의 두께가 변화되고 pi 및 in층 사이의 터널링(tunneling) 전류가 빛의 세기에 관계됨으로 Jsc가 I에 비례하지 않고 I<sup>0.91</sup>에 비례되는 것으로 생각된다.

비정질 실리콘의 광전기 전도도( $\sigma_{ph}$ )는 I<sup>r</sup>에 비례하고  $\gamma$ 는 시료의 제작 조건에 크게 관계되는데 0.5에서 1.0사이이다. 본 시료의 sandwich 구조에서 측정된 광전기전도도는 I<sup>0.85</sup>에 비례한다(그림 7 참조). 따라서 J<sub>sc</sub>와  $\sigma_{ph}$ 의 광세기 의존성이 상이함을 나타낸다.

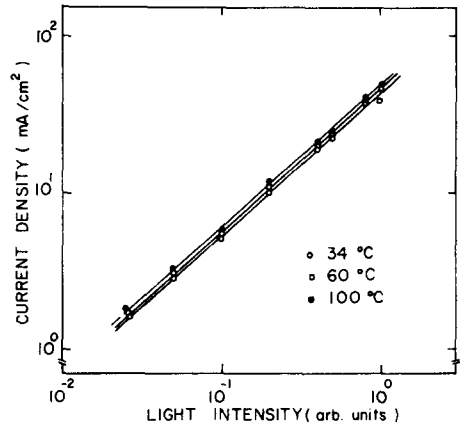


그림 2. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 입사광 세기에 따른 제회로 전류밀도의 변화, 빛의 세기 1은 170mW/cm<sup>2</sup>에 해당된다.

Fig. 2. Light intensity dependence of short circuit current density in a-Si:H pin solar cell. The light intensity 1 corresponds to 170mW/cm<sup>2</sup>.

그림 3은 입사광의 세기에 따른 Voc의 변화를 나타낸다. 낮은 광세기에서는 직선을 이루나 AM1 이상에서는 Voc가 점차로 포화됨을 나타낸다. 낮은 빛의 세기에서는 Voc=nkT/q ln (Jsc/Jo)의 관계식<sup>14)</sup>을 만족하며, 34°C에서 구한 n값은 1.72로 암 J-V 순 방향 특성에서 구한 1.80과 거의 일치된다. AM1 이상에서는 Voc가 pin 태양전지의 built-in potential에 거의 도달되어 빛의 세기 변화에 따라서 변화가 적은 것으로 생각된다. 이러한 점은 pin 태양전지에서의 built-in potential의 측정 및 Voc의 온도 의존성으로부터 연구 중이다.

그림 4는 입사광 세기에 따른 충실도를 나타낸다. 입사광의 세기가 증가되면 a-Si:H의 광전기전도도가 증가되어 직렬 저항이 감소되기 때문에 FF가 증가된다. AM1 이상에서 FF가 포화상태에 이르는 것은 ITO의 저항때문이다. 전류밀도가 10mA/cm<sup>2</sup> 이상 증가되면 ITO에 걸리는 전압때문에 FF가 더이상 증가되지 않는다. 이러한 현상은 태양전지의 크기에 크게 관계된다.

그림 5는 크기가 1.1 및 0.22cm<sup>2</sup>인 태양전지에서 빛의 세기에 따른 FF이다. 면적이 1.1cm<sup>2</sup>인 태양전지는 0.22cm<sup>2</sup>인 태양전지에 비하여 전류가 많이 흐르기 때문에 광세기의 증가에 따라서 FF가 증가되다가 낮은 광세기에서 최대를 이루고 다시 감소된다. 본 실험에 사용된 ITO의 판저항은 20Ω/square이다. ITO의

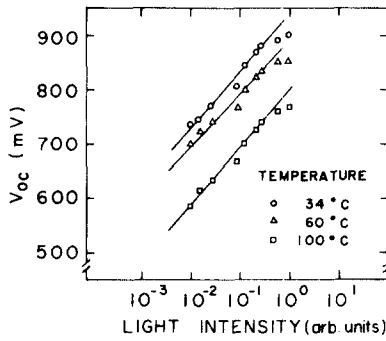


그림 3. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 입사광 세기에 따른 개회로 전압

Fig. 3. Open circuit voltage plotted against incident light intensity on a-Si:H pin solar cell.

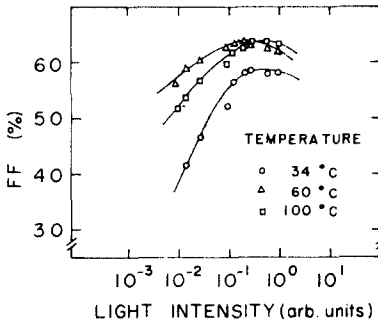


그림 4. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 입사광 세기에 따른 충실도

Fig. 4. Light intensity dependence of fill factor in a-Si:H pin solar cell.

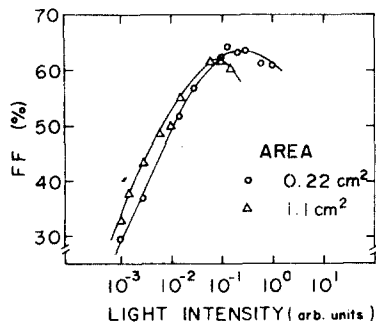


그림 5. 크기가 0.22 및 1.1cm<sup>2</sup> 인 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 충실도의 광세기 의존성

Fig. 5. Dependence of fill factor on light intensity for two (1.1 and 0.22cm<sup>2</sup>) a-Si:H pin solar cells.

판저항을 10Ω/square 이하로 감소시키기는 어려움으로 0.22cm<sup>2</sup> 이상에서는 ITO 위에 그리드를 증착하여 태양전지를 제작해야 AMI 정도에서 기판의 직렬저항 영향없이 태양전지를 제작할 수 있다.

그림 6은 빛의 세기에 따른 변환 효율을 나타낸다. 그림에서 AMI 근처에서 효율이 최대이다. 낮은 빛의 세기에서는 직렬저항이 크고 분류저항이 작아 효율이 낮으며 AMI 이상에서는 ITO의 저항 때문에 효율이 감소된다. 그림 6에는 200mW/cm<sup>2</sup>의 빛을 3시간 조사한 후의 변환 효율이 나타나 있다 (soaked state). 빛을 3시간 비춘후에 AMI에서는 약7%의 효율이 감소되었으나 낮은 빛의 세기에서는 50%이상 효율이 감소되었다. 낮은 빛의 세기에서는 직렬저항 및 분류저항이 빛의 장시간 조사 전후에 크게 변화되기 때문이다(그림 7 참조).

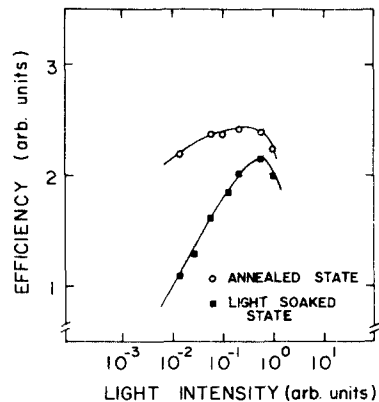


그림 6. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 변환 효율의 입사광 의존성

Fig. 6. Dependence of conversion efficiency on incident light intensity in a-Si:H pin solar cell.

빛을 장시간 비추기 전후의 직렬 및 분류 저항을 빛의 세기에 따라서 나타낸 그래프가 그림 7이다. 그림 7에서 직렬 저항은 광전기전도도의 증가 때문에 빛의 세기가 증가되면 감소된다. 그래프에서 구한 기울기가 아닐링 (annealing) 상태에서는 0.85, 빛을 오랫동안 받은 (soaked) 상태에서는 0.97이다. 이것은 광전기 전도도의 빛의 세기 의존성과 일치된다. 즉 아닐링 상태에서는 σ<sub>ph</sub>가 1<sup>0.85</sup>에, 오랫동안 빛을 받은 상태에서는 1<sup>0.97</sup>에 비례함으로 측정되었다.

분류 저항은 AMI 이상에서는 크게 차이가 없으나 낮은 광세기에서는 작은 값을 나타내고 빛의 세기를

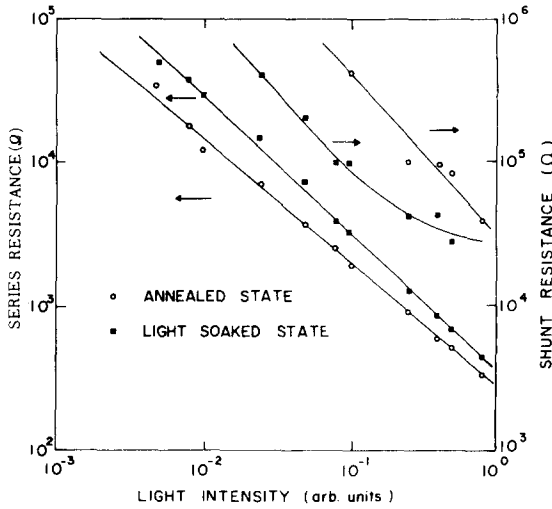


그림 7. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 직렬 및 분류저항의 광세기 의존성. 장시간 조사 효과를 나타냄

Fig. 7. Series and shunt resistances in pin a-Si:H solar cell plotted against incident light intensity. The figure shows the effect of long light exposure.

증가시키면 증가된다. 빛을 오랫동안 받은 시료는 낮은 광세기에서 특히 작은 분류저항을 나타내는데 이는 아닐링 상태에 비하여 흐르는 전류밀도가 낮은 광세기에서 훨씬 작기 때문이다.

그림 8은 장시간 빛을 비추기 전후에 측정된 직렬 저항을  $1/J_{sc}$ 에 대하여 그린 것이다. 측정 결과는 직선을 이루며 종축과 만나는 점의 저항( $R_c$ )은 면적이  $1\text{cm}^2$ 일 때에  $0.8\Omega$ 이다. 이 값은 태양전지와 ITO 접촉(contact) 사이의 ITO 저항 및 ITO와 실리콘 사이의 접촉 저항의 합이다. 그림에서  $(dV/dJ - R_c) \times J_{sc}$ 는 폐회로 상태에서 비정질 실리콘에 걸린 전압이다. 그림 8에서 아닐링 상태에서는 비정질 실리콘에 걸린 전압이  $0.088\text{V}$ 이고 빛을 오랫동안 받은 상태에서는  $0.13\text{V}$ 이다.

그림 9는  $34, 60, 100^\circ\text{C}$ 에서 측정된 직렬 저항을  $1/J_{sc}$ 의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서  $R_c$ 는 온도에 관계없이 일정하다. 이는 ITO의 저항이 측정온도 범위에서 일정하기 때문이다. 직선에서 구한 기울기는  $34^\circ\text{C}$ 에서  $99.4\text{mV}$ ,  $60^\circ\text{C}$ 에서  $73.9\text{mV}$ 이고  $100^\circ\text{C}$ 에서  $64.9\text{mV}$ 로 온도 증가에 따라서 감소된다.  $J_{sc}$ 는 온도 증가에 따라서 서서히 증가되나(그림 2 참조)  $(dV/dJ - R_c)$ 가 온도증가에 따라서 급격히 감소되기 때문에

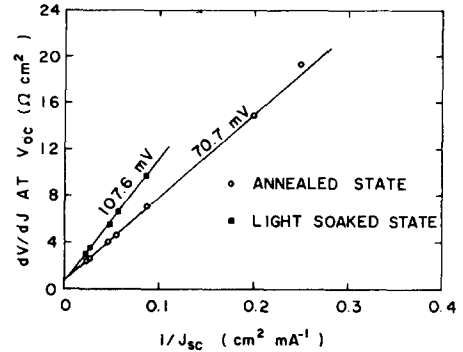


그림 8. 비정질 실리콘 태양전지의 전류-전압 특성 곡선에서 얻은 직렬 저항의  $1/J_{sc}$ 에 따른 변화. 그림은 태양전지에 장시간 조사효과를 나타낸다

Fig. 8. Plots of series resistance against  $1/J_{sc}$  in a-Si:H pin solar cell measured before and after long light exposure.

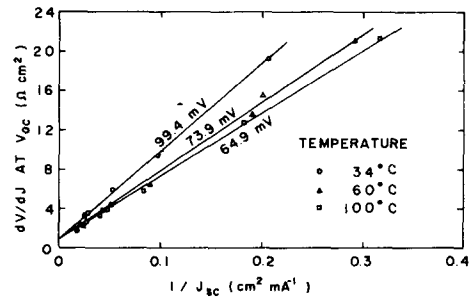


그림 9. 온도 변화에 따라서 측정된 직렬 저항의  $1/J_{sc}$  의존성

Fig. 9. Dependence of series resistance on  $1/J_{sc}$  measured at three different temperatures.

기울기가 감소된다.

그림 10은 장시간 조사가  $V_{oc}$ 와 FF의 빛의 세기에 의존성에 미치는 영향을 나타낸다. 빛의 세기에 따른 변화에서 구한 기울기( $n$ )가 빛을 받은 후에 증가되는 이유는 암 J-V 특성 곡선에서  $n$ 이 증가되는 것과 같다. 빛을 받은 후에 페르미 준위가 밴드 갭의 중간으로 이동되고 준안정(metastable) 상태의 결합들이 생기기 때문이다. Pin 태양전지에서는 인가된 전압이 pi와 in에 나뉘어 걸리는 데 페르미 준위가 갭중간에 위치하면  $1/2$ 씩 걸리게 된다. 따라서 페르미 준위가 중간으로 이동됨에 따라서  $n$ 이 증가된다. 다이오드상수  $n$ 은 재결합-생성 전류에 관계되어 빛을 장시

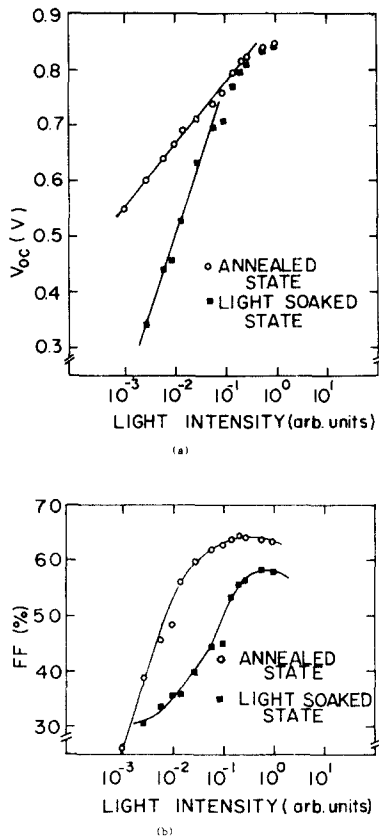


그림 10. 비정질 실리콘 pin 태양전지에서 장시간 빛을 조사시킨 전후에 측정된 개회로 전압(a)과 충전률(b)의 광세기의존성

Fig. 10. Effect of light exposure on the open circuit voltage(a) and fill factor(b) plotted against incident light intensity.

간 비준 후에 결함(defect)들이 생기면 증가된다.

#### IV. 結 論

글로우 방전에 의하여 실험실에서 제작한 효율 7.1%의 pin 태양전지의 Voc, Jsc, FF 등의 빛의 세기의 의존성을 조사하였다. 입사된 빛의 세기가 증가되면 직렬 저항이 감소되고 분류저항이 증가되어 FF, Voc 및 변환 효율이 증가된다. 그러나 그리드가 없는 크기 0.2cm<sup>2</sup> 이상의 태양전지에서는 AM1 정도에서 ITO의 처항 때문에 FF가 감소된다. 빛을 태양전지에 장시간 비추면 직렬 저항이 증가되고 분류 저항이 감소되어 변환효율이 감소되는데 특히 낮은 빛의 세기에서 큰 효과가 나타난다. Pin a-Si:H 태양전지의 개회로 상

태에서 a-Si:H에 걸린 전압은 빛의 세기에 관계없이 일정하나 온도가 증가되면 감소되고, 빛을 오랫동안 비추 후에는 증가된다.

#### 參 考 文 獻

- [1] W.E. Spear, P.G. LeComber, S. Kinmond and M.H. Broadsky, "Amorphous silicon pn junction," *Appl. Phys. Lett.* vol. 28, pp. 105-107, 1976.
- [2] H. Fritzsche, "Characterization of glow-discharge deposited a-Si:H," *Solar Energy Materials* vol. 3, pp. 447-501, 1980.
- [3] D.E. Carlson, "Recent development in amorphous silicon solar cells," *Solar Energy Materials* vol 3, pp 503-518, 1980.
- [4] Y. Hamakawa, "Recent progress of amorphous silicon technology and its application to optoelectronic devices," *Appl. Surface Science* vol. 22/23, pp. 859-878, 1985.
- [5] R. Williams and R.S. Crandall, "Carrier generation, recombination and transport in amorphous silicon solar cells," *RCA Review* vol. 40, pp. 371-389, 1979.
- [6] Y. Tawada, H. Okamoto and Y. Hamakawa, "A-SiC:H/a-Si:H heterojunction solar cell having more than 7.1% conversion efficiency," *Appl. Phys. Lett.* vol. 39, pp. 237-239, 1981.
- [7] Y. Kuwano, Private Communication.
- [8] D.L. Staebler and C.R. Wronski, "Optically induced conductivity changes in discharge produced hydrogenated amorphous silicon," *J. Appl. Phys.* vol. 51, pp. 3262-3268, 1980.
- [9] 장진, 이동한, 박홍준, 박혁렬, 이주천, 민석기, "증착 조건이 비정질 실리콘 pin 태양전지의 특성에 미치는 영향," *새물리* 24권, pp. 18-22, 1984.
- [10] 이동한, 이주천, 장진, "RF 글로우 방전에 의한 비정질 실리콘 pin 형 태양전지에서 p층의 최적 두께 결정," *새물리* 24권, pp. 40-45, 1985.
- [11] J. Jang and C. Lee, "Effect of discharge conditions on characteristics of hydrogenated amorphous silicon deposited by dc glow discharge decomposition," *Solar Energy Materials* vol. 7, pp. 377-384, 1982.
- [12] J. Jang and C. Lee, "Temperature depend-

- ent light induced conductivity changes in hydrogenated amorphous silicon," *J. Appl. Phys.* vol. 54, pp. 3943-3950, 1983.
- [13] Y. Uchida, Private Communication.
- [14] E. Ahlstrom and W.W. Gartner "Silicon surface-barrier photocells," *Appl. Phys. Lett.* vol. 39, pp. 733-735, 1981.
- [15] D.L. Staebler, R.S. Crandall and R. Williams, "Stability of nip amorphous silicon solar cells," *Appl. Phys. Lett.* vol. 39, pp. 733-735, 1981.
-