

비정질실리콘 태양전지에 대한 장시간 성능예측: 확장지수함수 모형 및 컴퓨터 모의실험

박상현^a · 유종훈^{b*}

^a한국에너지기술연구원, 대전 305-343

^b고려대학교 반도체물리학과, 연기 339-700

(2012년 3월 21일 받음, 2012년 5월 28일 수정, 2012년 6월 5일 확정)

태양광에 노출되어있는 동안 비정질실리콘 태양전지에서 일어나는 장시간 성능변화에 대해서 연구하였다. 그리고 결함밀도의 운동학 모형을 통해서 태양광으로 인한 태양전지 성능변화를 예측하였다. 특히, 전하운반자 수명이 결함밀도에 의해서 크게 영향을 받기 때문에 비정질실리콘 태양전지의 광유도 성능감소(light-induced degradation)가 확장지수함수 완화법칙(stretched-exponential relaxation)을 따르는 결함밀도에 의해서 물리적으로 설명된다. 그리고 확장지수함수 완화법칙과 AMPS-1D 컴퓨터 프로그램의 모의실험에 의해서 비정질실리콘 태양전지의 광유도 성능감소를 계산했고, 모의실험의 결과를 옥외에 설치한 태양전지의 측정데이터에 비교하였다. 본 연구는 상온에서 다음과 같은 특성을 갖는 전형적인 비정질실리콘 pin 태양전지에 대해서 모의실험을 진행했다: 두께 ≈ 300 nm, 내부전위 ≈ 1.05 V, 초기 결함밀도 $\approx 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 초기 단락전류 $\approx 15.8 \text{ mA/cm}^2$, 초기 채우기비율 ≈ 0.691 , 초기 개방전압 ≈ 0.865 V, 초기 변환효율 $\approx 9.50\%$.

주제어 : 비정질실리콘 태양전지, 광유도 성능감소, 결함밀도, 확장지수함수 완화법칙, 모의실험

I. 서 론

본 논문은 장시간 태양광에 노출된 비정질실리콘 태양전지 [1,2]의 성능예측에 관해서 연구하였다. 비정질실리콘의 광유도 성능감소 (light-induced degradation, LID) [3]는 이미 1977년 보고된 Staebler-Wronski 효과 [4]에 의해서 확인된 바 있다. 이는 비정질실리콘이 빛에 노출될 때, 이미 포함되어 있는 수소원자가 빛 에너지에 의해서 이동하고, 이로 인해서 생성 또는 소멸된 땀글링 본드(dangling bonds) 때문에 일어난다.

특히, 일상적인 태양광 노출 하에서 태양전지의 장시간 성능예측에 대한 물리적인 이해의 부족과 기술·환경적 요소의 어려움은 아직 안정된 태양전지 개발에 대해서 장해 요인으로 남아있다.

그러므로 본 논문에서는 비정질실리콘으로 구성된 태양전지가 태양광에 노출될 때 태양전지에서 일어나는 성능변화에 대한 물리적인 요인과 LID에 대해서 논의하고, 그리고 시간이 경과함에 따라서 변화하는 태양전지 성능을 예측하기 위해서 확장지수함수 모형과 AMPS-1D 컴퓨터 프

로그램을 사용한다.

II. 빛에 의한 결함생성

비정질실리콘 태양전지의 LID는 Staebler-Wronski 효과 (SWE)로 알려진 광유도에 의한 광전도율의 변화에 의해서 일어나고, 이는 빛에 의한 땀글링 본드의 직접적인 변화로 인해서 발생한다. Kakalios (J. Kakalios, R. A. Street, and W. B. Jackson, KSJ) [5]와 Stutzmann (M. Stutzmann, W. B. Jackson, and C. C. Tsai, SJT) [6]은 전하운반자 수명이 띠-사이 (band-to-band) 재결합과정에 의해서 생기는 땀글링 본드뿐만 아니라 띠간격에 있는 재결합중심들에 의해서 제한받음을 정량적으로 보고한 바 있다.

KSJ 계산에 의하면, 빛에 의해서 유도되는 결함밀도는 시간이 경과함에 따라서 다음과 같이 확장지수함수(stretched exponential)에 의해서 증가한다.

$$N(t) = N_{sat} - (N_{sat} - N_0) \exp[-(t/\tau)^\beta]. \quad \text{Eq. (1)}$$

* [전자우편] jhlyou@korea.ac.kr

Eq.(1)에서 N_{sat} 는 포화결함밀도, N_0 는 초기결함밀도, β 는 결함의 분산효과를 나타내는 계수, 그리고 τ 는 시간 상수이다. 특히, β 와 τ 는 각각 온도 T (절대온도)의 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{T}{T_0}, \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a/kT). \quad \text{Eq.(3)}$$

Eq.(2)~(3)에서 T_0 는 600 K, τ_0 는 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-8}$ sec, E_a 는 활성화 에너지로서 약 0.9~1.3 eV이다. 그러므로 우리는 N_0 및 N_{sat} 의 관측으로부터 빛에 의해서 형성되는 결함의 시간적 변화를 계산하고, 이를 통해서 태양전지의 장시간 성능예측이 가능하다.

III. 결과 및 고찰

그 동안 비정질실리콘 태양전지의 개발을 위해서 LID에 관한 연구가 지속적으로 진행되었다. 이러한 연구에 의하면 LID의 과정은 한편에서는 빛에 의한 결함생성, 그리고 다른 한편에서는 열완화(thermal annealing)에 의한 결함 소멸에 의해서 진행된다. 그러므로 SJT 계산에 의하면 포화결함밀도는 온도 T 에서 결함 생성률(G)의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$N_{sat} \propto G^{2/3} \exp(E_a/3kT). \quad \text{Eq.(4)}$$

태양전지의 장시간 성능을 예측하기 위해서 본 논문은 비정질실리콘으로 구성된 *pin* 구조에서 일어나는 LID에 초점을 맞추었다. 본 논문에서 사용한 비정질실리콘 태양전지는 $N_0 \approx 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_{sat} \approx 2 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $G = 1 \times 10^{20} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, $E_a \approx 0.9 \text{ eV}$ 의 특성을 갖는다.

KSJ 계산(Eq.(1))을 비정질실리콘 *pin* 구조에 적용하여 표준태양광 조건(AM 1.5, $I = 100 \text{ W/cm}^2$)에서 LID로 인한 결함밀도의 변화를 계산하였다. Fig. 1은 태양전지가 태양광에 노출될 때 시간이 지남에 따라서 증가하는 결함밀도의 변화를 보여 준다. 특히, 그림에서 보는 바와 같이 LID가 온도변화에 따라서 각각 다르게 진행함을 알 수 있다. 상온에서는 LID가 수개월 후 포화상태에 이르지만, 온도가

높아짐에 따라서 LID의 변화가 점점 줄어들어 포화상태로 더 빨리 진행함을 알 수 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 LID는 짧은 시간 동안에는 확장지수함수로서 결함이 증가하지만 LID가 오래 지속되면 Eq.(4)에 의해서 포화상태에 도달한다. 특히, LID의 포화는 온도가 높아짐에 따라서 일찍 나타나는데, 이는 시간이 지남에 따라서 태양광에 의한 결함의 생성이 열완화에 의한 결함의 소멸과 균형을 이루기 때문이다. Fig. 1에는 포함되지 않았지만 약 150°C 이상에서는 LID가 거의 관측되지 않는데 이러한 온도에서는 이미 잘 알려진 바와 같이 LID에 의해서 생긴 결함이 완전히 열완화되기 때문이다 [7].

즉, LID에 의한 결함의 생성과 열완화에 의한 결함의 소멸은 태양광에 대한 노출시간이 지남에 따라서 균형을 이루고, 이로 인해서 결함은 포화상태에 이른다. Fig. 1에서 LID에 의한 포화결함밀도가 온도 차이에 따라서 변하는 정도를 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 온도에서는 포화결함밀도가 초기결함밀도에 비해서 거의 열 배 이상 차이가 나지만 온도가 높아지면서 점점 더 LID에 의한 결함이 거의 존재하지 않는 초기상태 (annealed state)를 유지하게 된다.

태양광에 노출되는 동안 시간이 지남에 따라서 태양전지 변환효율 $\eta(t)$ 는 초기효율 $\eta(0)$ 에 대해서 다음과 같이 채우기 비율(fill factor, FF)과 단락전류(short-circuit current, J_{sc}), 그리고 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc})의 곱으로 주어진다.

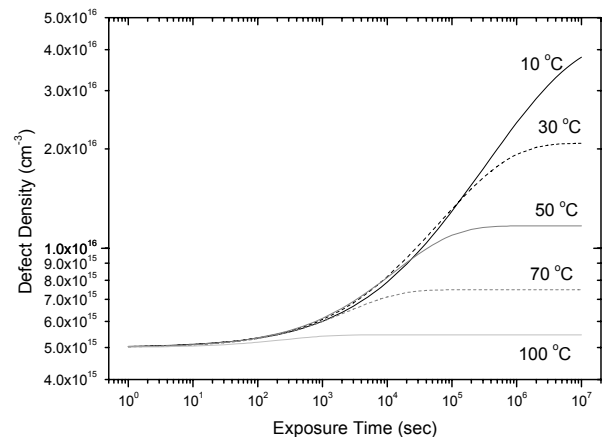


Figure 1. Defect density as a function of exposure time at various temperatures for a typical amorphous silicon solar cell.

$$\frac{\eta(t)}{\eta(0)} = \frac{FF(t)J_{sc}(t)V_{oc}(t)}{FF(0)J_{sc}(0)V_{oc}(0)} \quad \text{Eq. (5)}$$

Eq. (5)에서 $FF(0)$, $J_{sc}(0)$, 그리고 $V_{oc}(0)$ 는 각각 해당 초기 값이다. 특히, SWF 계산(Z. E. Smith, S. Wagner, B. W. Faughnan) [8]에 의하면 태양전지 변환효율은 전하운반자 수집거리(carrier collection length)에 깊게 관련성을 갖기 때문에 LID에 의한 결함밀도의 증가로 인해서 역으로 감소한다. 그러므로 우리는 SWF 계산을 통해서 비정질실리콘 태양전지의 LID 변화를 정량적으로 관측할 뿐만 아니라 물리적으로 이해할 수 있다.

비정질실리콘 태양전지의 LID 변화를 관측하기 위해서 펜실베이니아 주립대학교에서 개발한 AMPS-1D 컴퓨터 프로그램을 비정질실리콘 *pin* 태양전지에 적용해서 모의실험을 진행하였다 [9]. 모의실험에 사용한 물리적 요소들은 Table 1에서 보여진다. 모의실험을 위해서 비정질실리콘 *pin* 태양전지에 대한 물리적 요소뿐만 아니라 띠틈리 상태 및 중간-띠간격 상태의 요소가 사용되었다. Table 1에서 모의실험 기호는 AMPS-1D 프로그램에서 사용한 기호이고, 표에서 주어진 수치에 의해서 태양전지 성능요소를 계산하였다.

비정질실리콘에서 일어나는 LID 변화를 예측하기 위해서 KSJ 계산 및 AMPS-1D 모의실험을 *pin* 태양전지에 대해서 적용하였다. 특히 태양광 흡수가 대부분 고유층에서 일어나기 때문에 LID 변화에 대한 계산을 고유층에 한정하였고, p- 및 n-층에서는 LID 변화가 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 그리고 모의실험에 사용된 비정질실리콘

pin 태양전지는 Table 1의 특성 외에 상온 및 표준태양광 조건(AM 1.5 및 $I=100 \text{ mW/cm}^2$)에서 다음과 같은 물리적 성질을 갖는다. 태양전지 두께=300 nm, $N_0=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $G=3.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, 재결합상수= $7 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$, $\tau_0=2 \times 10^{-10} \text{ sec}$, 내부전위(built-in potential)=1.05 V [10].

비정질실리콘 *pin* 태양전지에 대해서 KSJ 계산(Eq. (1))과 AMPS-1D 모의실험을 적용한 결과가 Fig. 2에서 보여진다. 그림에서 보는 바와 같이 태양전지는 초기에 $J_{sc}=15.8 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.691$, $V_{oc}=0.865 \text{ V}$, $\eta=9.50\%$ 의 값을 갖는 반면에 1년이 지난 후 각각 $J_{sc}=14.9 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.595$, $V_{oc}=0.854 \text{ V}$, $\eta=7.57\%$ 로 줄어든다. 변환효율은 LID에 의해서 시간이 경과함에 따라서 약 20% 정도 감소함을 볼 수 있는데, 특히 낮은 온도에서 이와 같이 LID에 의한 감소가 오래 지속된다. 이는 Fig. 1에서 지적한 바와 같이 낮은 온도에서 결함의 열완화가 약하게 일어나기 때문이다. 즉, 10°C 에서는 1년이 경과한 후에도 여전히 LID가 지속되는 반면에, 70°C 에서는 일주일일이 경과한 후 LID가 거의 중지한다. Fig. 2에 포함하지는 않았지만 모의실험에 의하면 1개월이 경과한 시간을 기준으로 ($2.59 \times 10^6 \text{ sec}$) 태양전지 변환효율이 10°C , 30°C , 50°C , 및 70°C 에서 각각 26%, 20%, 12%, 그리고 4%씩 감소한다.

한편 비정질실리콘 태양전지가 옥외에 설치되었고, 태양전지의 LID 변화가 한국에너지연구원 옥외열화 모니터링 시스템에 의해서 측정되었다. 그리고 상온 및 표준태양광 조건(AM 1.5 및 $I=100 \text{ mW/cm}^2$)에서 다음과 같은 물리적 성질을 갖는 태양전지에 대해서 모의실험을 진행하였다.

Table 1. AMPS-1D parameters.

	Simulation Symbol	p-층	i-층	n-층
두께(nm)	Layer	8	300	25
전자 친화도(eV)	CHI	3.7	3.8	3.8
전기 띠틈격(eV)	EG	1.92	1.82	1.82
이동도($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	MUN/MUP	10/1	10/1	10/1
유효상태밀도(cm^{-3})	NC/NV	$2.5 \times 10^{20}/2.5 \times 10^{20}$	$2.5 \times 10^{20}/2.5 \times 10^{20}$	$2.5 \times 10^{20}/2.5 \times 10^{20}$
띠꼬리(bandtails)				
폭(eV)	ED/EA	0.1/0.05	0.05/0.02	0.05/0.02
Prefactor ($\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$)	GD0/GA0	$1 \times 10^{21}/1 \times 10^{21}$	$1 \times 10^{21}/1 \times 10^{21}$	$1 \times 10^{21}/1 \times 10^{21}$
전자단면적(cm^2)	TSIG ND/NA	$1 \times 10^{-15}/1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-15}/1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-15}/1 \times 10^{-17}$
정공단면적(cm^2)	TSIG PD/PA	$1 \times 10^{-17}/1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-17}/1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-17}/1 \times 10^{-15}$
중간-띠간격(mid-bandgap)				
상태에너지(eV)	EDONG/EACPG	1.16/0.76	1.06/0.76	1.06/0.76
초기상태밀도(cm^{-3})	NDG/NAG	$5 \times 10^{17}/5 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{15}/5 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{17}/5 \times 10^{17}$
포화상태밀도(cm^{-3})	NDG/NAG	$5 \times 10^{17}/5 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{16}/5 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{15}/5 \times 10^{15}$

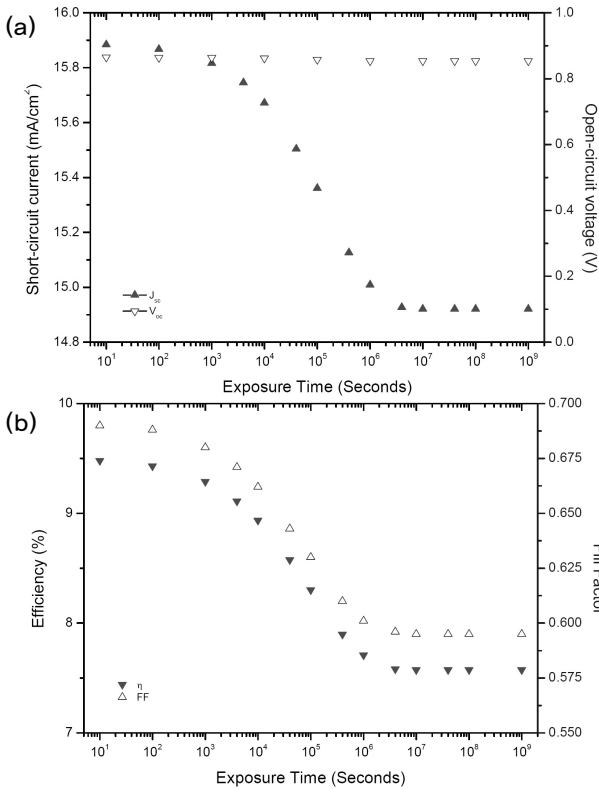


Figure 2. Solar cell performance parameters calculated by AMPS-1D computer program. (a) Short-circuit current density and open-circuit voltage as a function of exposure time for a typical amorphous silicon solar cell. (b) Conversion efficiency and fill factor as a function of exposure time for a typical amorphous silicon solar cell.

태양전지 두께=320 nm, $N_D=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $G=8.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 재결합상수= $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$, $\tau_0=3 \times 10^{-8} \text{ sec}$, 내부전위(built-in potential)=1.0 V. 태양전지의 측정은 약 3개월 동안 진행되었고, Fig. 3에서 3개월 후 변환효율이 약 20~25%씩 줄어들었음을 볼 수 있다. 그리고 모의실험 결과에 의하면 측정된 태양전지의 변환효율은 장시간 후 약 35% 줄어드는 것으로 예측된다.

그러므로 우리는 확장지수 결함밀도(KSJ), 포화결함밀도(SJT), 그리고 전하운반자 수집거리(SWF)와 같은 물리적 계산과 컴퓨터 모의실험에 의해서 비정질실리콘 태양전지에서 일어나는 LID 현상에 대해서 좀 더 기초적으로 이해할 수 있고, 그리고 이를 통해서 장시간 태양전지의 성능을 예측한다 [10].

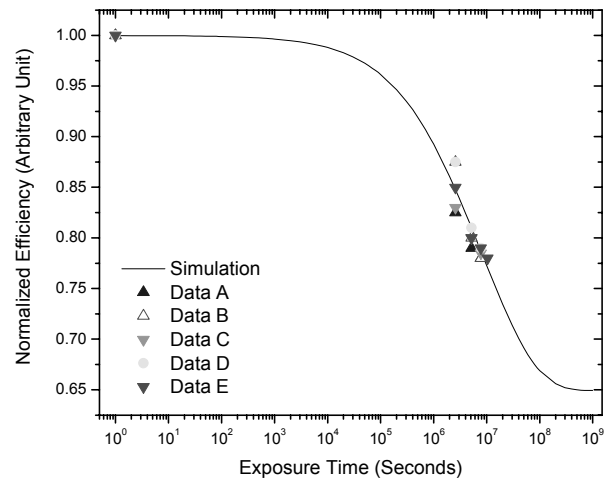


Figure 3. Normalized conversion efficiency as a function of exposure time. Line was calculated by AMPS-1D computer program for an amorphous silicon pin solar cell, while triangles were measured for outdoor performances of various solar cells, which were installed at Korea Institute of Energy Research.

IV. 결론

본 논문은 비정질 실리콘 태양전지에서 일어나는 LID를 물리적으로 이해하고, 이를 통해서 비정질실리콘 *pin* 구조의 장시간 성능을 예측하는데 연구의 초점을 맞추었다. 특히, 비정질실리콘 *pin* 태양전지의 LID를 이해하는데 확장지수 결함밀도(KSJ), 포화결함밀도(SJT), 그리고 전하운반자 수집거리(SWF)의 물리적 계산을 응용하였다. 그리고 태양전지에 대해서 AMPS-1D 컴퓨터 프로그램에 의한 모의실험을 진행하여 그와 같은 물리적 계산의 유용성을 확인하였다.

우리는 이와 같은 연구를 통해서 과학적으로 비정질실리콘의 광유도 성능감소를 이해하고, 기술적으로 효율 및 경제성이 높은 태양전지의 개발에 도전한다.

참고문헌

- [1] J. -H. Lee, J. Korean Vacuum Soc. **8**, 51 (1999).
- [2] S. -Y. Lee, J. Korean Vacuum Soc. **20**, 77 (2011).
- [3] D. Redfield and R. H. Bube, Appl. Phys. Lett. **54**, 1037 (1989).
- [4] D. L. Staebler and C. R. Wronski, Appl. Phys. Lett.

- 31**, 292 (1977).
- [5] J. Kakalios, R. A. Street, and W. B. Jackson, *Phys. Rev. Lett.* **31**, 1037 (1987).
- [6] M. Stutzmann, W. B. Jackson, and C. C. Tsai, *Phys. Rev. B* **32**, 23 (1985).
- [7] D. L. Staebler, R. S. Crandall, and R. Williams, *Appl. Phys. Lett.* **39**, 733 (1981).
- [8] Z. E. Smith, S. Wagner, and B. W. Faughnan, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 1078 (1985).
- [9] J. Arch, P. McElheny, M. Rogosky, S. Fonash, and W. Howland, *A Manual for AMPS-1D a One-dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures* (1994).
- [10] J. H. Lyou, E. A. Schiff, S. Guha, and J. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1924 (2001).

Long-Term Performance of Amorphous Silicon Solar Cells with Stretched Exponential Defect Kinetics and AMPS-1D Simulation

S. H. Park^a and Jong H. Lyou^{b*}

^a*Korean Energy Institute of Energy Research, Daejeon 305-343*

^b*Department of Semiconductor Physics, Korea University, Yeongi 339-700*

(Received March 21, 2012, Revised May 28, 2012, Accepted June 5, 2012)

We study for long-term performance of amorphous silicon solar cells under light exposure. The performance is predicted with a kinetic model in which the carrier lifetimes are determined by the defect density. In particular, the kinetic model is described by the stretched-exponential relaxation of defects to reach equilibrium. In this report, we simulate the light-induced degradation of the amorphous silicon solar cells with the kinetic model and AMPS-1D computer program. And data measured for outdoor performances of various solar cells are compared with the simulated results. This study focuses on examining the light-induced degradation for the following amorphous silicon pin solar cells: thickness \approx 300 nm, built-in potential \approx 1.05 V, defect density (at $t=0$) \approx 5×10^{15} cm⁻³, short-circuit current density (at $t=0$) \approx 15.8 mA/cm², fill factor (at $t=0$) \approx 0.691, open-circuit voltage (at $t=0$) \approx 0.865 V, conversion efficiency (at $t=0$) \approx 9.50%.

Keywords : Amorphous silicon solar cells, Light-induced degradation, Defect density, Stretched-exponential relaxation, Simulation

* [E-mail] jhlyou@korea.ac.kr