

단결정 태양전지의 단락 및 개방 시 노광에 의한 초기 출력저하 비교 분석

정태희*, 김태범**, 신준오***, 윤나리****, 우성철*****, 강기환*****, 안형근*****, 한득영*****

*건국대학교 전기공학과(come1986@empas.com), **건국대학교 전기공학과(ktbbb@nate.com),
*** 건국대학교 전기공학과(gobugii@konkuk.ac.kr), **** 건국대학교 전기공학과(orbstar86@cyworld.com),
*****건국대학교 전기공학과(scwooku@nate.com),*****한국에너지기술연구원(ghkang@kier.re.kr)
***** 건국대학교 전기공학과(hkahn@konkuk.ac.kr), ***** 건국대학교 전기공학과(dyhan@konkuk.ac.kr)

Analysis and comparison of initial performance degradation for single crystalline silicon solar cell under open and short circuit

Jung, Tae-Hee* Kim, Tae-Bum** Shin, Jun-Oh*** Yoon, Na-Ri**** Woo, Sung-Cheol*****,
Kang, Gi-Hwan***** Ahn, Hyung-Keun***** Han, Deuk-Young*****

*Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(come1986@empas.com),**Dept. of Electrical
Engineering, Konkuk University(ktbbb@nate.com), ***Dept. of Electrical Engineering, Konkuk
University(gobugii@konkuk.ac.kr), ****Dept. of Electrical Engineering, Konkuk
University(orbstar86@cyworld.com), *****Dept. of Electrical Engineering, Konkuk
University(scwooku@nate.com), *****Korea Institute of Energy Research(KIER)(ghkang@kier.re.kr),
*****Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(hkahn@konkuk.ac.kr),
*****Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University(dyhan@konkuk.ac.kr)

Abstract

It is well-known that Boron-doped Cz Si solar cells suffer light-induced degradation due to a boron-oxygen defect which is responsible of a reduction in lifetime and hence efficiency. In this paper, we assume that PV solar cell has been connected with variable load to account the real operating condition and it shows different light-induced degradation of Si solar cell. To evaluate the effect of light-induced degradation for solar cell with various load, Single crystalline solar cells are connected with open and short circuits during light exposure. Isc-Voc curve evaluate light induced degradation of solar cells and the reason is explained as a change for serial resistance. From the results, Electrical characteristics of solar cells show better performance under short circuit conditions, after light exposure.

Keywords : 태양전지 모듈(Photovoltaic module), 단결정 태양전지(Single crystalline solar cell), LID(Light Induced Degradation), 소수캐리어 수명시간(Minority carrier lifetime), 단락회로(Short circuit), 개방회로(Open circuit)

투고일자 : 2010년 10월 19일, 심사일자 : 2010년 10월 28일, 게재확정일자 : 2010년 12월 6일
교신저자 : 안형근(hkahn@konkuk.ac.kr)

기 호 설 명

V_{oc}	:개방전압(V)
I_{sc}	:단락 전류(A)
P_{max}	:최대 출력(W)
I_0	:역포화전류(A)
D	:확산계수(cm^2/s)
τ	: 소수캐리어 수명시간(s)
N	: 도핑농도(cm^{-3})
L	:소수캐리어 확산길이(cm)
n_i	:진성캐리어 농도(cm^{-3})

1. 서 론

PV 모듈은 옥외 설치 후 온도, 습도, 자외선 등의 외부적인 영향을 지속적으로 받으면서 PV모듈의 전기적 출력변화로 이어지고, 한편으로는 자체의 발전에 의한 전류가 생성됨으로써 이 또한 PV 모듈에 영향을 미치게 된다.

PV모듈이 옥외 설치 후 1년 동안 단락전류(I_{sc})는 1~5%정도의 출력 감소가 이루어지지만 개방전압(V_{oc})와 곡선인자(Fill Factor, FF) 거의 변화가 일어나지 않는다. 그렇지만 장기간 옥외 노출 시 PV모듈은 전극부식이나 납땜부분의 크랙 등에 의해 직렬저항(R_s) 증가는 곡선인자(Fill Factor, FF) 감소의 형태로 나타나며, EVA와 태양전지 사이의 변색에 의한 단락전류(I_{sc})가 감소하는 등의 다양한 원인에 의해 출력 감소가 일어난다.[1]

특히 초기의 출력감소 요소 중 결정질 태양전지의 광에 의한 초기 출력저하(Light Induced Degradation, LID)의 경우 초크랄스키(Czochralski, CZ)법에 의한 p-type 웨이퍼 제조 과정에서 불순물로서 사용되는 붕소(Boron, B)와 산소(Oxygen, O)의 결합밀도증가에 의한 소수캐리어의 수명시간 감소로써 출력 특성의 변화가 일어난다.[2] 하지만 200℃이상의 온도에서 어닐링(annealing) 함으로써 초기 출력 감소 효과를 상쇄시킬 수 있지만, 최근에는 노

광이 된 상태에서 보다 낮은 온도인 70℃~160℃에서도 어닐링(annealing)과 유사한 효과가 나타나고, 이후상온에서 노광이 일어나도 태양전지의 출력변화가 적게 일어나는 것을 알 수 있다.[4][5]

한편 노광에 태양전지의 출력 저하를 최소화하는 방법으로써 붕소(Boron, B)를 대신하여 갈륨(Gallium, Ga)을 도핑함으로써 Si과 보다 안정적인 결합에 의한 노광이후의 안정화 출력효율이 붕소(Born,B)를 도핑한 태양전지 보다 약 0.5% 이상 높게 나오는 것을 볼 수 있다.[6]

이와 같이 PV모듈이 옥외 설치된 이후 출력 감소 요인은 다양하게 존재하며 특히 붕소(Boron, B)가 도핑되어 있는 단결정 태양전지 경우 광에 의한 초기 출력저하(Light Induced Degradation, LID)가 심하게 나타나지만 현재 연구는 도펀트(Dopant) 변화나 어닐링(annealing)조건등의 태양전지 자체에 초점이 맞추어져 있다.

하지만, 본 연구에서는 태양전지 자체 보다는 붕소(Born, B)를 포함하는 태양전지가 옥외 설치되었을 가정하여 부하저항의 변화로 광에 의한 초기 출력저하(Light Induced Degradation, LID)를 비교하여 출력변화 최소 방안을 분석하였다.

2. 실 험

2.1 실험 방법

본 연구에서는 단결정 태양전지의 PN층을 단락시킨 상태에서 노광하면서 태양전지의 초기 출력대비 출력 변화를 확인하였고, PN층을 전기적으로 개방시킨 상태에서 외부로의 캐리어의 흐름이 없는 상태에서 노광에 의한 출력변화를 확인 비교하였다.

본 실험에서 광에 의한 초기 출력저하(LID)를 잘 나타내기 위해 초크랄스키(CZ)방법으로 제작되었고, p-type의 불순물을 붕소(B) 도핑하여 저항율이 약 5[Ω-cm]인 단결정 웨이퍼로 제작된 상업용 태양전지를 이용하였

다. 표 1은 실험이 이루어지기 전의 태양전지 출력 특성을 나타내고 있다.

표 1. 실험전의 각각의 solar cell 전기적인 출력 특성

요소 cell	Voc [V]	Isc [A]	Pmax[W]	Fill Factor [%]	Efficiency [%]	Series resistance[Ω]
Open cell	0.622	8.11	3.9	77.17	16.33	0.008
Short cell	0.617	8.10	3.84	76.78	16.1	0.008

실험이 진행 될 때 노광은 제논(Xenon)광원으로 AM 1.5 조건인 $1[kW/m^2]$ 에서 노광하였으며 실험 중 온도의 영향을 최소화하기 위하여 태양전지의 온도는 $25^{\circ}C$ 를 유지시켰으며, 두 시료 모두 동일한 시간, 장소의 자연습도 상태에서 실험이 이루어졌다. 태양전지의 접촉저항 변화를 최소화시키기 위해 지그(Jig)에 태양전지를 고정시키며 노광이 이루어 졌다. 매 시간 Light 와 Dark I-V를 측정하여 10시간 태양전지의 광에 의한 출력 저하(LID) 변화를 관찰하였다.

2.2 실험 결과

본 실험을 통하여 개방 상태에서 노광에 따른 태양전지의 단락전류(Isc) 감소가 크게 일어나는 것을 알 수 있었다.

표 2. 단락과 개방 상태에서 노광에 따른 태양전지의 Isc 변화

구분 [Min]	Isc-short [mA]	Isc-open [mA]
0	8096	8107
60	8070	8077
120	8060	8079
180	8080	8102
240	8053	8105
300	8076	8086
360	8058	8078
420	8065	8043
480	8034	7996
540	8021	7991
600	8036	7993

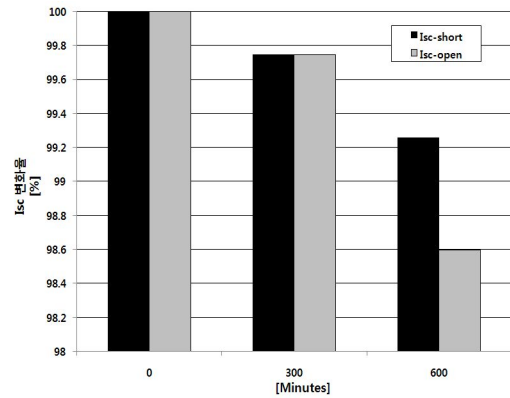


그림 1. 단락과 개방 상태에서 노광에 따른 태양전지의 Isc 변화율

표 2를 통하여 단락 상태에서 태양전지에 노광이 이루어질 때 단락전류(Isc)는 8096[mA]에서 8036[mA]로 지속적으로 태양전지의 출력감소가 일어나는 것을 알 수 있다. 반면에 개방 상태에서 노광이 될 때 초기 단락전류(Isc)가 8107[mA]인 태양전지가 600분에서는 7993[mA]로 감소되지만, 출력감소의 형태는 단락상태와 다르게 노광이 이루어지고 240분 정도에서 어느 정도 단락전류(Isc)가 증가하고 그 이후에 지속적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 1에서 초기 태양전지의 단락전류(Isc)를 100%로 가정하고 출력변화를 비교해보면 노광이 이루어지고 난 뒤 300분까지는 거의 동일한 비율로 변화가 일어나지만 그 이후로 출력감소가 달라져 600분에서 단락상태에서 노광이 이루어질 때 0.74%정도의 비율로 출력감소가 일어났지만, 개방 상태에서 1.4%의 출력 감소가 일어난다.

표 3를 보면 단락 상태에서 태양전지에 노광이 이루어질 때 180분까지는 개방전압(Voc)는 거의 변화가 없지만, 이후 지속적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있으며 그 감소 비율은 0.26%로써 단락전류(Isc)의 변화율 보다 미약함을 알 수 있다. 반면에서 개방상태에서 노광이 이루어 질 때는 600분까지 선형적으로 Voc의 감소가 일어나고 개방전압(Voc)의 감

소 경향이 다르게 일어나며, 그 비율은 0.62%로써 단락 상태에서 보다 더 큰 개방전압(Voc) 저하가 발생한 것을 확인 할 수 있다.

표 3. 단락과 개방 상태에서 노광에 따른 태양전지의 Voc 변화

구분 [Min]	Voc-short [V]	Isc-open [V]
0	0.6178	0.6226
60	0.6176	0.6221
120	0.6179	0.6211
180	0.6179	0.6212
240	0.6169	0.6206
300	0.6167	0.6203
360	0.6168	0.6200
420	0.6163	0.6198
480	0.6163	0.6197
540	0.6162	0.6196
600	0.6161	0.6188

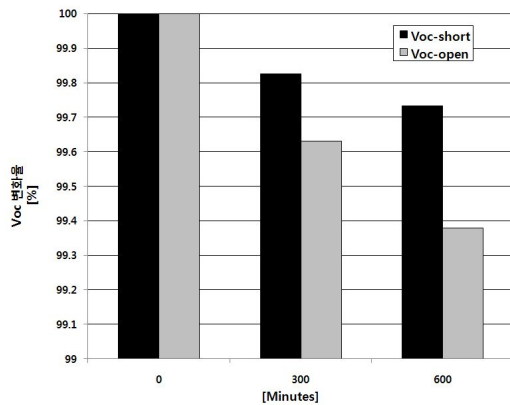


그림 2. 단락과 개방 상태에서 노광에 따른 태양전지의 Voc 변화율

표 4는 태양전지의 실험전과 600분의 노광된 이후 전기적인 특성을 나타내고 있다. 이 결과 중 가장 두드러진 특성은 최대 출력(Pmax)으로써 단락상태에서 노광이 이루어질 때의 최대 출력(Pmax)변화는 97.9%이지만 개방상태에서의 최대 출력(Pmax)은 95.1%정도의 출력감소가 발생한다. 결국 이는 단락, 개방상태에서의 효율(Efficiency)에 영향을 미쳐 각

각 0.33%와 0.75%의 효율 변화가 발생한다. 직렬저항의 경우 단락상태에서는 0.001[Ω]증가하였지만 개방상태에서는 0.002[Ω]의 증가한 것을 볼 수 있다.

표 4. 단락과 개방상태에서 태양전지 전기적 특성변화 비교

	단락상태		개방상태	
	초기값	600분	초기값	600분
Voc[V]	0.617	0.616	0.622	0.618
Isc[A]	8.10	8.03	8.11	7.99
Pmax[W]	3.84	3.76	3.9	3.71
Fill Factor[%]	76.78	75.97	77.17	75.13
Efficiency [%]	16.10	15.77	16.33	15.58
Series resistance [Ω]	0.008	0.009	0.008	0.01

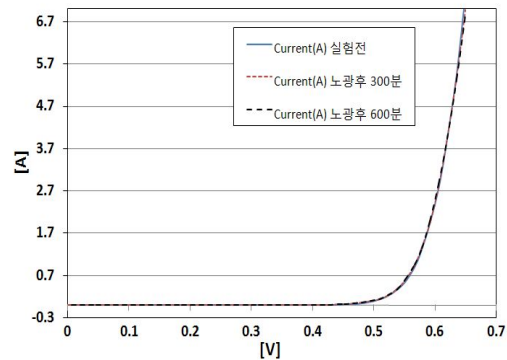


그림 3. 태양전지 단락 상태에서의 노광에 의한 Dark I-V curve

그림 3과 그림 4는 암(Dark) 상태에서 I-V 곡선을 나타내고 있다. 그림 3는 단락상태에서의 노광이 이루어질 때의 I-V곡선으로써 시간에 따른 그래프의 변화는 거의 존재 하지 않는다. 반면 그림 4에서와 같이 시간에 따른 기울기의 변화는 존재하며, 특히 직렬저항 성분이 실험 전 태양전지의 직렬저항이 7.36[Ω]에서 600분이 경과한 이후의 직렬저항은 7.52[Ω]으로써 약 2.16%증가하는 것을 확인 할 수 있다.

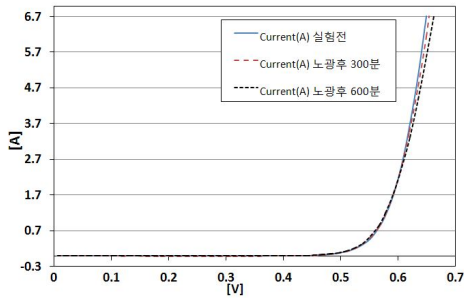


그림 4. 태양전지 단락 상태에서의 노광에 의한 Dark I-V curve

2.3 고찰

일반적으로 노광이 이루어지고 난 직후 단결정 태양전지의 초기 출력감소는 붕소(B)과 산소(O)의 결합 밀도의 증가에 의한 결함(defect)의 증가에 의한 소수캐리어의 수명시간 변화에 의한 출력 감소로 설명한다.[7]

표 4를 통하여, 태양전지가 개방된 상태에서 노광이 이루어 질 때 전기적인 출력 특성 저하가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

일반적으로 태양전지 등가회로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[8]

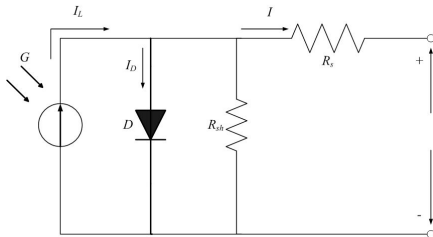


그림 5. 태양전지 등가 회로

또한 등가식은

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

로 표현한다. 이 때 태양전지의 n-type의 도핑 농도가 p-type의 도핑 농도보다 훨씬 높고, 암전류(Dark current)는 직렬저항만 포함하는 다이오드 등가식으로 가정하면 다음과 같다.[9]

$$I_d = I_0 [e^{q(V - IR_s)} - 1] \quad (2)$$

$$I_0 = qA \left(\frac{D_N n_i^2}{L_N N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} \right) \cong qA \frac{D_N n_i^2}{L_N N_A} \quad (3)$$

$$L_N = \sqrt{D_N \tau_N} \quad (4)$$

위 식을 바탕으로 측정된 암전류(Dark current)에 대응되는 역포화전류(I_0)를 식(2)를 이용하여 임의의 값을 구할 수 있다. 식(3)에서 노광에 의한 역포화전류(I_0)변화는 단지 확산길이(L_N)변화에 의해서만 달라진다고 두면 결국 노광에 의한 소수캐리어 수명시간(τ)을 유도할 수 있다. 식(3)과 (4)를 통하여 τ_0, τ 과 같이 노광이 이루어지기 전과후의 수명시간 변화비를 유도 할 수 있다.

표 5. 유도된 소수캐리어 수명시간 변화율

	역포화전류 (실험전) [A]	역포화전류 (실험후) [A]	수명시간 변화비 (τ/τ_0)
Short	1.08×10^{-8}	1.21×10^{-8}	0.80
Open	0.97×10^{-8}	1.15×10^{-8}	0.71

표 5를 통하여, p-type의 소수캐리어 수명인 전자의 수명시간은 개방상태에서 보다 큰 변화가 일어나는 것을 유도 할 수 있다.

3. 결 론

초기 노광에 따른 태양전지의 출력저하 특성(LID)은 아직 명확한 원인 규명 및 해결방법은 아직 확립되어 있지 않다. 하지만 일반적으로 노광에 의한 출력저하(LID)연구는 태양전지 자체의 연구에 국한 되어 이루어지고 있다. 현재 붕소(B)가 포함되어 있는 단결정 태양전지는 지금도 많이 생산되고 모듈로 제작되어 실제 옥외에 설치되고 있다. 본 연구에서는 태양전지의 노광에 의한 출력 저하(LID)연

구의 일환으로써 부하조건을 변화시켜 분석함으로써 보다 효과적으로 광에 의한 출력저하(LID)에 의한 손실을 최소화 할 수 있는 연구를 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 붕소(B)가 포함되어 있으며, 초크랄스키(CZ)방법으로 제작된 웨이퍼로 만든 단결정 태양전지를 이용하여 일사량이 일정한 상태에서 노광이 이루어질 때 태양전지를 PN 층을 단락 및 개방상태로 두고 전기적인 특성 변화를 보았다.
- (2) 개방상태에서 노광이 이루어질 때 출력 특성 저하가 심하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 붕소(B)와 산소(O)에 의한 결합밀도 증가는 태양전지 등가회로상의 직렬저항 증가의 원인임을 알 수 있었다.
- (3) 측정된 암전류(Dark current)를 바탕으로 계산된 소수캐리어의 수명시간 변화율은 개방상태에서 보다 큰 감소가 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.
- (4) 이 결과는 PV모듈 제작과정, 보관 및 옥외 설치 이후 출력감소를 최소화하기 위해 가능한 태양전지 PN층의 전류 흐름이 최대한 원활하게 조건을 설정함으로써 효율적으로 광에 의한 출력감소(LID)를 최소화 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2008-N-PV-P-01-3-020-2008)

참 고 문 헌

1. Kengo Morita, Takamitsu Inoue, Hiroshi Kato, Izumi Tsuda, Yoshihiro Hishikawa "DEGRADATION FACTOR ANALYSIS OF CRYSTALLINE-Si PV MODULES

- THROUGH LONG-TERM FIELD EXPOSURE TEST" 3rd world conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18, 2003 Osaka, Japan..
2. Hiroshi Hashigami, Yu Itakura, Tadashi Saitoh "Effect of illumination conditions on Czochralski-grown silicon solar cell degradation" Journal of applied physics, Volume 93, Number 7, 2003, pp 4240-4245.
3. Ben Damiani, Mohamed Hilali, Ajeet Rohatgi "LIGHT INDUCED DEGRADATION IN CZOCHRALSKI SILICON DURING ILLUMINATED HIGH TEMPERATURE PROCESSING" IEEE, 2002, pp 348-351
4. Hiroshi Hashigami, Marwan Dhamrin, Tadashi Saitoh "Performance Degradation of Czochralski-Grown Silicon solar cells by Means of Current Injection" Jpn J. Appl.Phys. Vol.41. 2002 pp L1191-L1193.
5. Bianca Lim, Karsten Bothe, Jan Schmidt "Modeling the generation and dissociation of the boron-oxygen complex in B-doped CZ-Si" IEEE, 2008.
6. Vichai Meemongkolkiat, Kenta Nakayashiki, Ajeet Rohatgi, Geoffrey Crabtree, Jeff Nickarson, Theresa L. Jester "The effect of the variation in resistivity and lifetime on the solar cells performance along the commercially grown GA-and B doped czochralski ingots" IEEE, 2005, pp1115-1118.
7. S.W.Glunz, S.Rein, W.Warta, J.Knobloch, W.Wettling "Degradation of carrier lifetime in CZ silicon solar cells" Solar Energy Materials & Solar cells ,2001, pp219-229
8. 이재형, 임동건, 이준신 "태양전지 원론" 홍릉과학출판사, 2005
9. Robert F. Pierret "Semiconductor Device Fundamentals" Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1996