

사막형 결정질 실리콘 태양전지의 에미터 구조에 따른 온도 별 특성 변화 분석

남윤정¹⁾ · 김수민¹⁾ · 강윤목²⁾ · 이해석^{1)*} · 김동환^{1)*}

¹⁾고려대학교 신소재공학과, 서울시, 136-713

²⁾고려대학교 그린스쿨대학원 에너지환경정책기술학과, 서울시, 136-713

Analysis on Temperature Dependence of Crystalline Silicon Solar Cells with Different Emitter Types for Desert Environment

Yoon Chung Nam¹⁾ · Soo Min Kim¹⁾ · Yoonmook Kang²⁾ · Hae-Seok Lee^{1)*} · Donghwan Kim^{1)*}

¹⁾Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

²⁾KU-KIST Green School, Graduate School of Energy-Environment Policy and Technology, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT: Different power output of solar cells can be observed at high-temperature regions such as desert areas. In this study, performance dependence on operating temperature of crystalline silicon solar cells with different emitter types was analyzed. Based on the light current-voltage (LIV) measurement, temperature coefficients of short-circuit current density (J_{SC}), open-circuit voltage (V_{OC}), fill factor (FF) and power conversion efficiency were measured and compared for two groups of crystalline silicon solar cells with different emitter types. One group had homogeneously doped (conventional) emitter and another selectively doped (selective) emitter. Varying the operating temperature from 25 to 40, 60, and 80°C, LIV characteristics of the cells were measured and the properties of saturation current densities (J_0) were extracted from dark current-voltage (DIV) curve. From the DIV data, effect of temperature on the performance of the solar cells with different electrical structures for the emitter was analyzed. Increasing the temperature, both emitter structures showed a slight increase in J_{SC} and a rapid degradation of V_{OC} . FF and power conversion efficiency also decreased with the increasing temperature. The degrees of J_{SC} increase and V_{OC} degradation for two groups were compared and explained. Also, FF change was explained by series and shunt resistances from the LIV data. It was concluded that the degradation of solar cells shows different values at different temperatures depending on the emitter type of solar cells.

Key words: Desert, temperature dependence, emitter structure, silicon solar cells, current-voltage characteristics

Nomenclature

J_{SC} : short-circuit current density, mA/cm²

V_{OC} : open-circuit voltage, V

FF : fill factor

J_0 : saturation current density, mA/cm²

R_S : series resistance, Ω -cm²

R_{sh} : shunt resistance, k Ω -cm²

n_i : intrinsic carrier concentration, cm⁻³

Subscript

LIV : light current-voltage

DIV : dark current-voltage

1. Introduction

최근 화석연료 자원의 고갈과 고유가화, 환경오염 문제가 대두됨에 따라 태양광 발전과 같은 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 태양전지의 출력을 최대로 유지하기 위해서는 일조량이 많은 지역이 유리한데, 일반적으로 사막 환경에서는 연간 일조량이 높기 때문에 사막 환경에서 사용되는 태양전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 높은 일조량의 지역은 온 환경 또한 수반하게 되며, 이로 인해 태양전지의 출력 특성이

*Corresponding author: Ihseok@korea.ac.kr, solar@korea.ac.kr

Received July 11, 2014; Revised July 15, 2014;

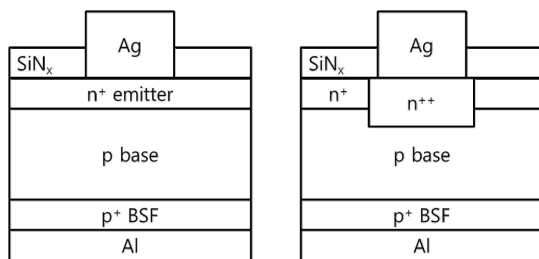
Accepted July 15, 2014

변할 수 있는 단점이 존재한다. 한국의 경우 결정질 실리콘 태양 전지 모듈은 야외에서 50-60°C 범위의 온도에 노출될 수 있으며, 집광형 태양전지의 경우 집광도에 따라 온도가 1000°C의 범위까지 올라간다¹⁻²⁾. 고온 환경에서 결정질 실리콘 태양전지는 온도 상승에 따라 약 2.3 mV·K⁻¹의 비율로 V_{oc} 가 감소하게 된다. 온도 상승으로 인한 태양전지 출력 저하를 감소시키기 위한 방안으로 냉각 장치를 설치하는 등의 다양한 노력이 이루어지고 있다. 태양전지의 온도에 따른 성능 저하를 개선시키기 위한 태양전지의 구조 및 물성의 특성이 Martin A. Green et al.에 의해 연구 되었다³⁻⁵⁾.

본 연구에서는, 고온 환경에서 낮은 출력 저하 특성을 가지는 사막형 태양전지 제작을 위하여 태양전지의 에미터 구조에 따른 온도 계수를 분석하였다. Conventional 에미터와 selective 에미터 구조를 가지는 단결정 실리콘 태양전지의 전류-전압 특성을 측정하였으며, 온도에 따른 태양전지 성능 및 다이오드 특성 변화를 관찰 및 분석하였다.

2. Experiment

본 연구에 사용된 태양전지는 Czochralski 방식을 통해 성장된 1-3 Ω·cm 비저항(resistivity)을 가지는 실리콘 기판을 이용하였으며, B이 도핑된(100) 방향의 실리콘 기판의 전면에 요철 구조(texturing)를 형성하여 입사광의 반사를 감소시켰다. 실험에 사용된 시편을 두 그룹으로 나누어 제작하였다. 첫 번째는 P의 확산을 이용하여 conventional 에미터 층을 형성하였으며, 두 번째는 일부 지역을 고농도로 도핑하여 전면 전극의 접촉 특성을 개선하고 빛이 흡수되는 부분은 저농도로 도핑하여 재결합을 감소시키는 selective 에미터를 형성하였다. 에미터 형성 공정 이후 습식 식각 방법을 이용하여 phosphorus silicate glass (PSG) 층을 제거하였다. 태양전지의 전면에서 발생하는 빛의 반사를 감소시키기 위한 반사 방지막(anti-reflection coating, ARC)으로 SiN_x를 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 기법으로 증착하였다. 태양전지의 전극을 형성하기 위하여 스크린 프린팅 기법을 적용하였으며, 전면 전극 물질로는 Ag를, 후면 전극 물질로는 Al을 사용하였다. 최종적으로 제작된 태양전지의 구



(a) conventional 에미터 구조 (b) selective 에미터 구조

Fig. 1. 스크린 프린팅 결정질 실리콘 태양전지 구조

조는 Fig. 1에 나타내었다.

태양전지의 온도에 따른 성능 변화 측정을 위하여 시편의 온도가 25-80°C 일 때의 LIV 특성을 측정하였다. 25°C를 기준으로 80°C에서 나타나는 태양전지의 효율 저하를 통하여 각 매개 변수 별 온도 계수를 계산하였다. 또한, 포화 전류 밀도(J_0)의 온도 의존성을 관찰하기 위하여 온도의 변화에 따른 DIV 특성을 측정하였다.

3. Results and Discussion

태양전지의 온도 별 LIV 특성 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 태양전지의 에미터 구조 별 온도에 따른 전환 효율 감소를 나타낸다. Conventional 에미터 태양전지의 경우 25°C에서의 전환 효율인 18.0%와 대비하여 80°C에서 12.9%의 전환 효율을 보이며 28.3%의 감소율을 나타내었으며, selective 에미터 태양전지는 18.6%에서 13.8%로 25°C에서의 전환 효율 대비 25.8%의 감소율을 보였다. 결과적으로 conventional 에미터 태양전지의 온도 증가에 따른 전환 효율 감소가 selective 에미터 태양전지의 경우보다 크게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 2(b)에서 확인할 수 있는 것과 같이 conventional 에미터와 selective 에미터의 J_{sc} 특성은 온도에 따른 증가율이 각각 0.019 mA·cm⁻²·K⁻¹, 0.018 mA·cm⁻²·K⁻¹으로써 서로 유사한 값을 가지며 25°C일 때와 80°C일 때의 J_{sc} 차이를 계산하면 각각 2.87%, 2.82% 씩 증가하는 경향을 보인다. J_{sc} 의 증가는 다음 식을 통해서 설명이 가능하다.

$$J_{sc} = \frac{qD}{LN_D} n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT} - 1\right) \quad (1)$$

여기서, q 는 전하량, D 는 소수 반송자 확산 계수, L 은 소수 반송자 확산 거리, N_D 는 도핑 농도, n_i 는 진성 캐리어 농도, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다. Eq. (1)에서 온도에 따른 J_{sc} 의 변화와 관련된 요소 중 가장 큰 영향을 미치는 변수는 n_i 이다. Eq. (2)를 통해 n_i 의 온도 의존성을 알 수 있다⁶⁾.

$$n_i = 5.29 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300}\right)^{2.54} \exp\left(-\frac{6726}{T}\right) \quad (2)$$

25°C에서 실리콘의 n_i 는 6.73E+19 cm⁻³이며 80°C에서는 1.80E+23 cm⁻³로 증가한다. 따라서, 온도가 증가함에 따라 에미터의 종류에 상관 없이 결정질 실리콘 내부의 n_i 가 증가하게 되어 J_{sc} 의 증가에 직접적인 원인으로 작용하며 실험 결과에서 J_{sc} 의 증가율 또한 에미터의 종류와 관계 없이 거의 같은 값을 나타내고 있다.

Fig. 2(c)에서 나타난 바와 같이 V_{oc} 의 경우는 태양전지의 온도가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 온도 증가에 따른

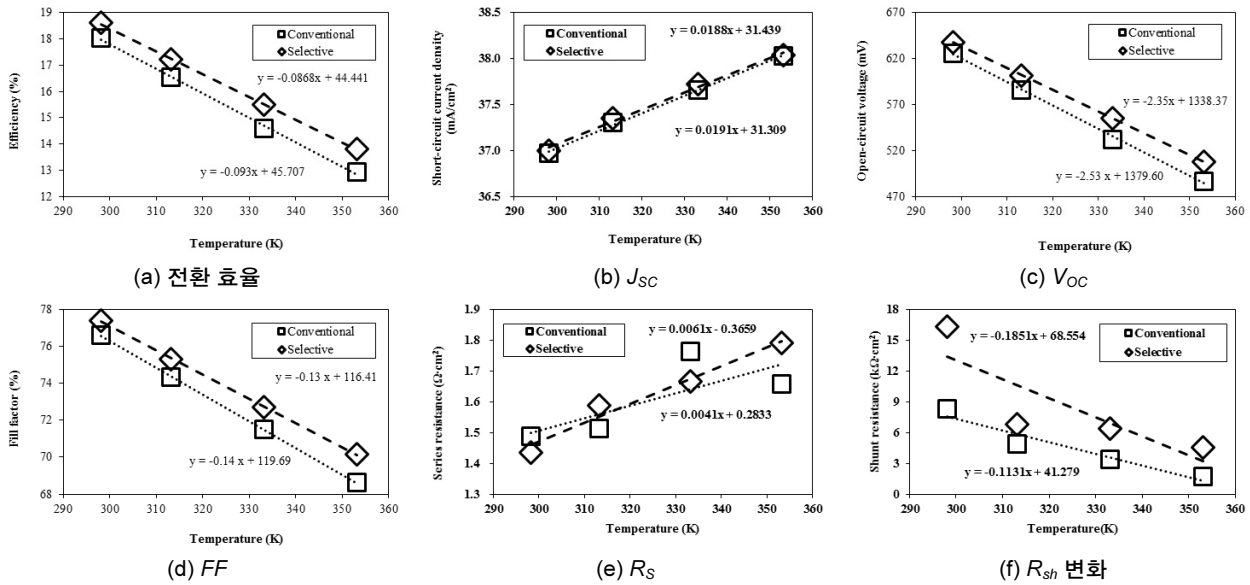


Fig. 2. 결정질 실리콘 태양전지의 에미터 구조 별 온도 증가에 따른

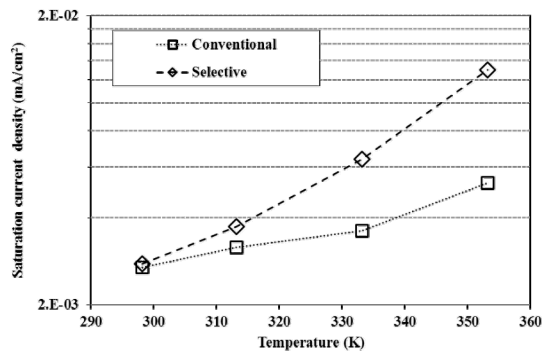


Fig. 3. 결정질 실리콘 태양전지의 에미터 구조 별 온도 증가에 따른 포화 전류 밀도의 증가

V_{oc} 의 감소는 전환 효율 감소에 직접적인 영향을 미치게 된다. 온도에 따른 V_{oc} 의 감소율을 비교해 보면, conventional 에미터의 경우 $2.53 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 의 값을 가지며, selective 에미터의 경우 $2.35 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 의 값을 나타낸다. 또한, 25°C 일 때에 비해 80°C 일 때의 V_{oc} 가 conventional 에미터의 경우 22.2%, selective 에미터일 경우 20.3% 감소한다. 온도의 증가에 따라 V_{oc} 가 감소하는 원인은 J_0 의 증가에 있다. Eq. (3)은 J_0 와 V_{oc} 간의 관계를 나타낸다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) \quad (3)$$

Fig. 3은 DIV 측정을 통해 추출한 온도에 따른 에미터 구조 별 J_0 를 나타낸다. J_0 의 경우는 J_{sc} 와 V_{oc} 와는 반대로 conventional 에미터의 온도 의존성이 selective 에미터의 온도 의존성보다 더 낮은 결과를 보였다. 25°C 와 80°C 에서의 J_0 증가율을 비교해 봤을 때, conventional 에미터의 경우 96.5%, selective 에미터의

경우 무려 368%가 증가하였다. 온도가 증가할수록 conventional 에미터의 J_0 증가율과 selective 에미터의 J_0 증가율의 차이가 커진다. J_0 는 태양전지의 LIV 특성에서 나타나는 R_{sh} 와 밀접한 관련이 있는데, Fig. 2(f)를 통해 R_{sh} 의 에미터 구조 별 온도 의존성의 경향이 J_0 의 경우와 유사함을 알 수 있다. 즉, R_{sh} 또한 conventional 에미터의 경우보다 selective 에미터의 경우일 때 온도 증가에 따른 열화 현상이 많이 일어난다고 볼 수 있다.

Fig. 2(d)에 나타난 바와 같이 FF 또한 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. FF 에 대한 온도 계수는 conventional 에미터 $0.14\%\cdot\text{K}^{-1}$, selective 에미터 $0.13\%\cdot\text{K}^{-1}$ 로 계산되었다. 태양전지의 온도가 25°C 에서 80°C 로 증가하면서 conventional 에미터의 경우 10.4%의 감소율을, selective 에미터는 9.34%의 감소율을 보였다. 즉, FF 도 J_{sc} , V_{oc} 와 같이 conventional 에미터 태양전지의 온도 의존성이 selective 에미터 태양전지의 온도 의존성보다 높다는 것을 의미한다. FF 는 전류-전압 곡선 모양에 따라 결정되는데, 이 곡선의 모양을 바꾸는 요인으로 R_s 와 R_{sh} 가 있다. R_s 와 R_{sh} 각각에 의해 저하되는 FF 는 다음의 경험식 Eq. (4)-(5)로 설명된다.

$$FF_s = FF_0(1 - 1.1R_s) + \frac{R_s^2}{5.4} \quad (4)$$

$$FF_{sh} = FF_0\left(1 - \frac{V_{oc} + 0.7 FF_0}{V_{oc} R_{sh}}\right) \quad (5)$$

FF_s 는 직렬 저항에 의해 저하되는 FF 를, FF_{sh} 는 병렬 저항에 의해 저하되는 FF 를, FF_0 는 이상적인 태양전지의 FF 를 나타낸다. 실험 결과를 이용하여 R_s 와 R_{sh} 를 계산해 본 결과, Fig.

2(e)-(f)에 나타난 바와 같이 conventional 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지 모두 온도에 따라 R_s 는 증가하고, R_{sh} 는 감소하는 경향을 보였으며, 이는 FF 를 감소시키는 원인이 된다. R_s 가 온도 증가에 따라 증가하는 이유는 소수 반송자의 수집 과정에서 전자의 산란 현상이 증가되기 때문인 것으로 사료된다. Conventional 에미터 태양전지의 R_s 는 25°C에서 80°C로의 온도 증가에 따라 11.5%의 증가율을 보였으며, selective 에미터 태양전지의 증가율은 24.7%로 conventional 에미터의 경우보다 증가율이 높다. Selective 에미터 태양전지의 R_s 에 대한 온도 계수 또한 $0.006 \Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ 로 conventional 에미터 태양전지의 R_s 온도 계수인 $0.004 \Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ 보다 높다. 반면, conventional 에미터 태양전지의 R_{sh} 는 25°C에서 80°C로의 온도 증가에 따라 79.4%의 감소율을 보였으며, selective 에미터 태양전지의 경우 71.9%의 감소율을 보였다. R_{sh} 의 25°C 대비 80°C 감소율은 conventional 에미터의 경우가 selective 에미터의 경우보다 높았지만, 온도 계수를 비교했을 때 R_{sh} 도 R_s 와 마찬가지로 conventional 에미터 태양전지의 경우가 selective 에미터 태양전지의 경우보다 온도 의존성이 낮았으며, 온도 계수는 각각 $-0.113 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-1}$, $-0.185 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ 으로 나타났다.

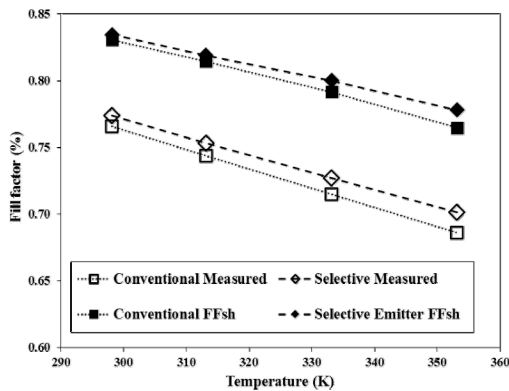


Fig. 4. 에미터 구조에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 충진율 비교

Fig. 4는 온도 증가에 따른 R_{sh} 의 감소로 인한 FF_{sh} 를 Eq. (4)를 이용하여 계산한 결과와 측정된 FF 를 비교한 그래프이다. R_{sh} 와 FF 의 온도 계수를 에미터 구조 간에 비교했을 때 온도 의존성에 대한 경향이 반대였지만, Eq. (4)를 이용하여 FF_{sh} 를 계산한 결과, 실제 측정된 FF 와 FF_{sh} 는 유사한 경향을 보였다. 따라서 온도에 따른 FF 변화는 R_{sh} 의 영향을 받는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 전환 효율, V_{OC} , FF , R_s , R_{sh} 의 온도 구간 별 열화율을 에미터 구조에 따라 나타낸 것이다. 전환 효율과 V_{OC} 의 경우 낮은 온도 범위보다 높은 온도 범위에서 열화율이 높은 것을 알 수 있으며, 40-60°C 구간에서 가장 높은 열화율을 보인다. FF 또한 낮은 온도 범위에서 열화율이 가장 낮으나, 그 이상의 온도 구간에서는 유사한 열화율을 보인다. 에미터 구조 별 전환 효율 저하율을 비교해 봤을 때, 25-40°C 구간의 경우 conventional 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지의 열화율 차이가 1% 미만이므로 온도가 40°C를 넘지 않는 지역의 경우 conventional 에미터 태양전지를 사용하는 것이 유리하다. 하지만 40-60°C의 환경에서는 selective 에미터 태양전지의 열화율이 1.54% 낮기 때문에 selective 에미터 태양전지를 사용함으로써 효율 저하를 방지할 필요가 있다. 온도가 60°C 이상인 지역에서는 에미터 구조가 효율 저하율에 크게 영향을 미치지 않으므로 conventional 에미터 구조를 사용하는 것이 유리하다.

R_s 와 R_{sh} 의 경우, 온도 구간 별 열화율의 변화가 매우 크다. R_s 와 R_{sh} 로 판단했을 때, 25-40°C의 온도 범위에서는 conventional 에미터 태양전지를, 40-60°C의 온도 구간에서는 selective 에미터 태양전지를 사용하는 것이 합리적이다. 60-80°C의 환경에서는 R_s 의 경우 conventional 에미터 태양전지의 열화율이 낮을 반면, R_{sh} 는 selective 에미터 태양전지의 열화율이 낮다. 두 인자를 적절히 고려하여 에미터 구조를 디자인한다면, 온도 증가에 따른 태양전지 성능 저하를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

온도에 따른 태양전지 성능을 나타내는 온도 계수를 Table 1에 정리하였다. 에미터 구조에 따라서 태양전지의 전환 효율, J_{SC} , V_{OC} , FF , R_s , R_{sh} 이 온도에 반응하는 정도가 다르다. 이를 통

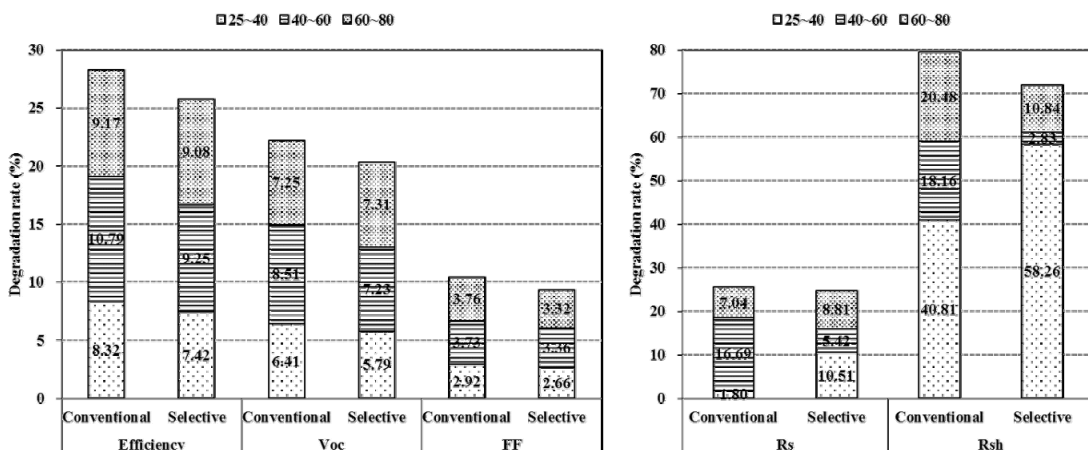


Fig. 5. 온도 구간별 태양전지 성능 저하 분포

Table 1. 결정질 실리콘 태양전지 에미터 구조 별 LIV 특성의 온도 계수

Emitter Type	Eff. (%/K)	J_{sc} (mA/cm ² /K)	V_{oc} (mV/K)	FF (%/K)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$ /K)	R_{sh} (k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ /K)
Conventional	-0.093	0.019	-2.53	-0.14	0.004	-0.113
Selective	-0.086	0.018	-2.35	-0.13	0.006	-0.185

해 태양전지의 구조적인 요소가 태양전지 특성의 온도 의존성에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 에미터 종류 외에도 태양전지 구조 별 온도 의존성을 비교한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

4. Conclusions

사막과 같은 고온의 지역, 혹은 일교차 및 연교차가 큰 지역에서 태양전지의 성능 변화를 파악하기 위해 conventional 에미터를 가지는 결정질 실리콘 태양전지와 selective 에미터의 구조를 가지는 결정질 실리콘 태양전지의 전류-전압 특성을 측정하였다. 온도를 25°C에서 80°C로 증가시킴에 따라 두 가지 태양전지 모두 전환 효율이 감소하였으며, conventional 에미터 태양전지의 효율이 더 큰 비율로 감소하였다. J_{sc} 는 온도의 증가에 따라서 소폭 상승하는 결과를 확인할 수 있었지만, V_{oc} 와 FF의 경우 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. J_{sc} 의 경우, 에미터 구조가 J_{sc} 의 증가율에 큰 영향을 미치지 않았으며, selective 에미터 태양전지의 전환 효율, V_{oc} , FF의 감소율이 conventional 에미터 태양전지 보다 낮은 것을 확인할 수 있었다. 측정된 FF는 R_{sh} 에 의한 FF를 계산하여 얻은 FF_{sh} 의 그래프와 유사한 경향을 보였다. 온도 구간 별로 에미터 구조에 따른 전환 효율, V_{oc} , FF, R_s , R_{sh} 의 열화율을 계산하였다. 전환 효율은 40-60°C 범위에서 가장 높은 열화율을 보였으며, 온도 구간에 따른 에미터 구조 별 태양전지 성능 열화율을 통해 각 지역의 온도 범위에 맞는 에미터 구조를 결정할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133010011760).

References

1. J. C. Fan, "Theoretical temperature dependence of solar cell parameters", solar cells, 17, 309-315, 1986.
2. C. Min, C. Nuofu, Y. Xiaoli, W. Yu, B. Yiming, Z. Xingwang, "Thermal analysis and test for single concentrator solar cells", Journal of Semiconductors, 30, 044011, 2009.
3. M.-I. Jeong, V. Janardhanam, K. Moon, J.-S. Kim, K.-S. Shin, C.-J. Choi, "Reverse leakage current mechanism in crystalline silicon solar cells with n+/P junctions", 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011.
4. M. A. Green, "General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling", Progress in Photovoltaics, 11, 333-340, 2003.
5. P. Singh, N.M. Ravindra, "Temperature dependence of solar cell performance—an analysis", Solar Energy Materials and Solar Cells, 101, 36-45, 2012.
6. K. Misiakos, D. Tsamakis, "Accurate measurements of the silicon intrinsic carrier density from 78 to 340K", Journal of Applied Physics, vol. 74, no. 5, p. 3293, 1993.