

PERC 태양전지 모듈의 출력저하 방지를 위한 모스아이(Moth-eye) 광학필름 연구

오경석¹ · 박지원¹ · 최진영² · 천성일^{1,†}

¹한국전자기술연구원, ²주나노메카

A Study of Moth-eye Nano Structure Embedded Optical Film with Mitigated Output Power Loss in PERC Photovoltaic Modules

Kyoung-suk Oh¹, Jiwon Park¹, Jin-Young Choi², and Sung-il Chan^{1,†}

¹New & Renewable Energy Research Center, Korea Electronics Technology Institute,

25 Saenari-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13509, Korea

²Nanomecca, 72-36 Yeiksam-dong, Gangnam-gu, Seoul 06223, Korea

(Received November 12, 2020: Corrected December 28, 2020: Accepted December 30, 2020)

초 록: 태양광 발전소에 설치된 PERC 태양광 모듈 스트링-어레이는 고전압의 전위차로 인해 여전히 potential-induced degradation(PID) 열화 현상이 여전히 보고되고 있다. 이는 태양전지 모듈 커버글라스의 Na⁺ 이온이 태양전지 봉지재(EVA)를 투과하여 셀 표면으로 전이되고 결함이 많이 분포되어 있는 ARC(SiO_x/SiN_x) 계면에 양전하가 축적됨으로써 shunt-Resistance(R_{sh})가 감소되고 누설전류량이 증가되어 태양전지 출력이 저하되는 현상이다. 본 연구에서는 이를 방지하기 위해 나노임프린트 리소그래피(nano-imprint lithography, NIL) 방식을 이용하여 모스아이(Moth-eye) 나노 구조를 광학 필름 후면에 증착 하였고, 이를 커버글라스와 EVA 사이에 삽입하여 태양광 미니 모듈을 구성하였다. PID 열화 현상을 확인하기 위해 IEC 62804-1 규격에 기반한 셀 단위 PID 열화가속시험을 진행하였고, Light I-V, Dark I-V 분석을 통해 출력(P_{max}), 효율(Efficiency), 병렬 저항(shunt resistance)을 확인하였다. 그 결과 기존의 태양전지는 초기 효율 19.76%에서 6.3% 감소하였으나 모스아이 나노 구조 광학 필름(Moth-eye film)이 적용된 태양전지는 0.6% 만 감소하여 PID 열화 현상이 방지되는 것을 확인하였고, 모스아이 나노구조를 통해 투과도가 4% 향상되어 미니 모듈 출력이 2.5% 향상되었다.

Abstract: The PERC photovoltaic (PV) modules installed in PV power plant are still reports potential-induced degradation (PID) degradation due to high voltage potential differences. This is because Na⁺ ions in the cover glass of PV modules go through the encapsulant (EVA) and transferred to the surface of solar cells. As positive charges are accumulated at the ARC (SiO_x/SiN_x) interface where many defects are distributed, shunt-resistance (R_{sh}) is reduced. As a result, the leakage current is increased, and decrease in solar cell's power output. In this study, to prevent of this phenomenon, a Moth-eye nanostructure was deposited on the rear surface of an optical film using Nano-Imprint Lithography method, and a solar mini-module was constructed by inserting it between the cover glass and the EVA. To analyze the PID phenomenon, a cell-level PID acceleration test based on IEC 62804-1 standard was conducted. Also analyzed power output (P_{max}), efficiency, and shunt resistance through Light I-V and Dark I-V. As a result, conventional solar cells were decreased by 6.3% from the initial efficiency of 19.76%, but the improved solar cells with the Moth-eye nanostructured optical film only decreased 0.6%, thereby preventing the PID phenomenon. As of Moth-eye nanostructured optical film, the transmittance was improved by 4%, and the solar module output was improved by 2.5%.

Keywords: Nano imprint lithography, Moth-eye structure, PERC solar Cell, Conversion Efficiency, Potential-induced degradation.

[†]Corresponding author
E-mail: chansil1000@keti.re.kr

© 2020, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

화석 연료 사용으로 인한 지구온난화를 비롯한 각종 환경 문제와 화석연료 에너지원의 고갈로 인해 친환경 신재생 에너지 자원에 대한 관심은 꾸준히 증가하여 왔다. 신재생에너지의 주요 에너지원으로 각광받고 있는 태양광 발전은 2019년 6월 제 3차 에너지기본계획으로 2040년까지 신재생에너지 발전 비중을 30~35%로 확대하기로 발표하였고 그 결과 코로나19사태 발생에도 불구하고 2020년 1분기 태양광 설치량은 분기 보급량 기준 사상 최초로 1 GW를 돌파하였다. 이중 PERC 태양전지 모듈의 보급률이 대다수를 차지하고 있으며, 여전히 2020년 현재 ISFH 그룹이 26.1%의 변환효율을 가지고 있는 PERC 구조의 고효율 태양전지를 NREL Best Research-Cell Efficiency Chart에 등재하였다.¹⁾ 하지만 이러한 PERC 태양광 모듈은 인버터의 용량에 따라 600~1000V 시스템을 구성하기 위해 스트링-어레이의 형태의 직렬 연결로 태양광 발전소에 구성되어 있으며 장시간 외부 환경에 노출되어 고장 및 열화 현상에 의한 출력 저하 현상이 발생된다. 특히 접지된 모듈의 태양전지와 프레임 사이에 고전압이 인가되어 전위차가 발생하게 된다. 또한 다습한 환경조건으로 인해 커버 글라스, 봉지재(EVA 또는 POE), 태양전지 셀의 계면(interface)에서 누설전류가 발생되게 되며 이때 소다 라임(soda-lime)재질의 커버글라스에 존재하는 불순물인 Na⁺이온이 봉지재를 투과한다. 그 결과 PERC 태양전지의 반사 방지막(anti-reflection coating, ARC)층의 SiO_x 및 SiN_x 계면에 전이되어 Stacking fault를 채워 병렬 저항(shunt resistance, R_{sh})을 저하시켜 누설전류량이 증가하게 된다. 이와 같은 Potential-induced degradation(PID)현상에 따른 발전 출력 저하 문제가 지속적으로 보고되고 있다.²⁾ 이러한 PID에 의한 출력 저하 현

상을 방지 하고 태양광 모듈의 신뢰성 평가를 위해서는 셀 단위 접근법 및 모듈 단위 접근법이 필요하다.²⁾ 셀 단위 방지를 위해서는 Na⁺이온의 확산을 방지하고 shunting path를 감소하기 위해 ARC 층의 SiN_x의 위 또는 아래에 SiO_x와 같은 방지층(barrier)를 도입하는 방법이 있다⁹⁾. 하지만 이 경우 굴절율이 2.14 이상인 경우 태양전지 효율이 감소하는 단점이 발생한다. 모듈 단위 방지를 위해서는 커버글라스와 봉지재 사이에 고체적저항을 가지는 PET 재질의 고분자 필름을 삽입하여 Na⁺이온의 확산을 원천적으로 차단하는 방법이 있다.³⁾ 이 경우 또한 PET 필름의 두께 및 굴절율로 인해 입사광이 커버 글라스를 투과 하였을 때 PET 필름 표면에서의 반사와 투과도(Transmittance) 하락에 의한 광학적인 손실이 발생되기 때문에 초기 출력이 떨어지는 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 열화현상으로 인해 PERC 태양전지 모듈에서 발생하는 출력 저하를 해결하고자 나노임프린트 리소그래피(nano-imprint lithography, NIL)를 이용하여 모스아이(Moth-eye) 광학필름을 제작하고 태양전지 모듈에 적용하였다. 이를 통해 Na⁺이온의 확산을 방지하여 PID 열화를 저감하고, Moth-eye 나노구조를 통한 투과도를 개선하여 광학적 손실을 방지 하고자 하였으며, 이를 통해 PERC 태양전지 모듈의 초기 출력을 향상 시키고자 하였다.

2. Experimental

본 연구에서는 PERC 태양전지 모듈의 출력저하 방지를 위해 모스아이 나노구조 광학필름(Moth-eye film)을 제작 하였다.⁴⁻⁶⁾ Fig. 1은 Moth-eye 나노 구조의 증착 방법을 나타 내었다.⁴⁾ 30×30 cm 크기의 Moth-eye 패턴의 Ni 마스터 스탬프가 e-beam 리소그래피로 제작되었으

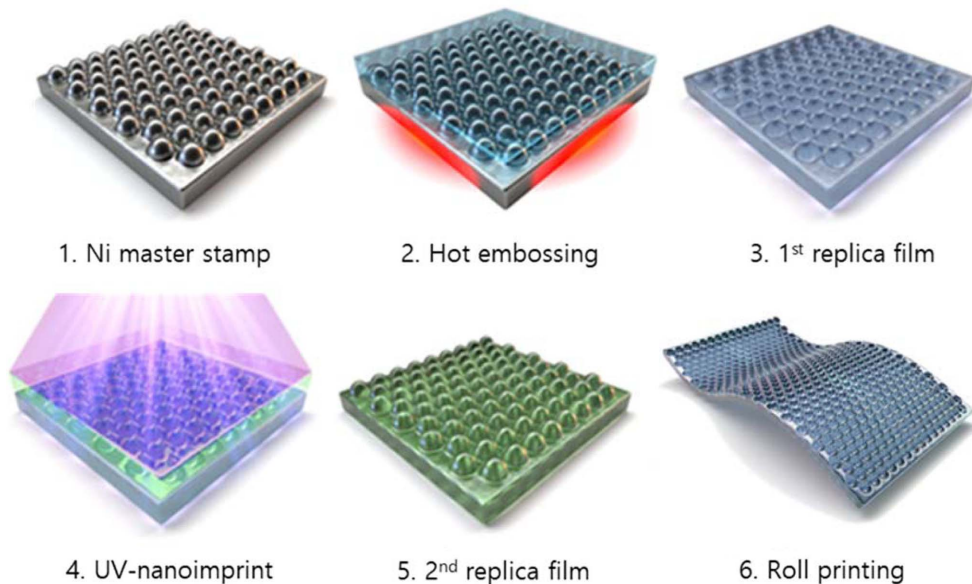


Fig. 1. Process of Moth-eye nano structure optical film fabrication using nano-imprint lithography.⁸⁾

며, Polyethylene terephthalate(PET) 재질의 광학필름을 Ni마스터 스탬프에 놓고 120°C에서 20분동안 유지하였고, 이후 PET필름을 20 bar 압력에서 20분동안 압축하여 실온으로 냉각시켰다.⁷⁾ 그 후 PET 광학필름을 Ni 마스터 스탬프에서 박리하여 1차 복제 필름을 제작하였다. 1차 복제 필름은 최종 나노 구조 광학필름을 위한 마스터 필름으로 사용하기 위해 heptadecafluoro-1,1,1,2,2-tetra-hydrodecyl 물질을 이용하여 Self-assembled monolayer (SAM) 코팅하였고 표면 에너지를 낮추었다. 이후 DT-7000 UV레진(High tech Co., South Korea)를 이용하여 UV NIL를 진행 하여 2차 복제 필름을 제작하였다. 이렇게 제작된 여러장의 2차 복제 필름을 롤 프린팅용 마스터 필름으로 사용하여 최종 Moth-eye film을 제작 하였다.⁸⁾ Fig. 2는 Moth-eye film 기반 PID 열화 방지 및 출력 개선 연구를 위한 PERC셀 및 모듈의 구조이다. PERC 태양전지는 ARC레이어를 구성하는 SiO_x 및 SiN_x 의 구조에 따라 PID 열화에 의한 효율 및 출력저하율이 달라진다. 특히 SiO_x 의 박막이 SiN_x 박막과 N-type 에미터 사이에 위치할 경우 PID-s의 저항이 증가된다.¹⁹⁾ PID열화에 의한 효율 및 출력감소율을 확인하기 위하여 Fig. 2의 (A)와 같이 P-type PERC 실리콘 태양전지 제조공정중에 Phosphorous Silicate Glass (PSG) 제거 공정 이후 PECVD방법으로 단일 SiN_x 층만 구성하여 SiO_x 박막이 인위적으로 제거된 ARC층을 형성 하였다.⁹⁾

이러한 SiO_2 -free PERC 태양전지를 이용하여 최상단에는 3.3T 두께의 특수 저철분 강화유리(커버 글라스)를 사용하였으며, 태양전지 전면 및 후면에 봉지재(Ethylene Vinyl Acetate, EVA)를 적층 하며, 최하단에는 PE/PET/W-PET 구조의 백시트를 사용하였으며, 커버 글래스 및 전면 봉지재 사이에 Fig. 2의 (B)와 (C)와 같이 일반적인 광학필름(initial film) 및 Moth-eye film을 삽입하여 2종의 모듈 구조를 구성하였고 라미네이터(Laminator)를 이용하여 160°C 온도 및 0.4 Mpa에서 30분동안 고온압착하여 모듈을 제작하였다. 광학 필름의 투과도(Transmittance) 및 반사도(Reflectance)를 확인하기 위하여 UV-visible spectroscopy (Cary 5000)를 사용하였으며, Moth-eye 나노 패턴의 특성을 확인하기 위하여 Field-emission scanning

electron microscopy(FE-SEM, Hitachi, S-4300, Japan)을 사용하였다. PERC 태양전지 및 모듈의 효율(Eff), 출력(P_{max}), PID열화율 분석을 위해 1-Sun (AM 1.5G) 환경의 솔라 시뮬레이터(Wacom Electronic Co., Ltd)를 사용하였으며, Shunt-Resistance 비교분석을 위해 Dark I-V 분석 장치(Source measurement Unit 2401 series, Keithly Instruments)를 사용 하였다.

3. Results and Discussion

본 연구는 NIL을 이용하여 Moth-eye film을 제작하였으며 이를 PERC 태양전지 모듈에 적용하여 출력 및 효율을 향상하는 동시에 PID현상에 의한 열화를 방지하였다. Fig. 3은Moth-eye film과 initial film을 UV-visible spectroscopy를 이용하여 투과율 및 반사율을 분석한 결과이다. Fig. 3의 (A)에서 보는것과 같이 400 nm~800 nm의 Wavelength 범위에서 Moth-eye film의 투과도가 initial film 보다 전체적으로 높다. 특히 550 nm Wavelength 기준에서 Bare film은 90%의 투과도를 나타내며 Moth-eye film은 4%가 증가된 94%의 투과율을 나타낸다. 또한 Fig. 3의 (B)에서 보는것과 같이 반사율은 300 nm~800 nm 구간에서 Moth-eye film이 initial film보다 전체적으로 낮으며, 특히 550 nm Wavelength 기준에서 initial film이 10%이며 Moth-eye film은 4% 낮은 6%의 반사율을 나타낸다. 이는 Fig. 3의 (C)와 (D)에서 볼 수 있듯이 6각 배치로 일정하게 형성된 Moth-eye 패턴의 구조적인 특징으로 인해 광학적 특성이 개선된다.¹⁰⁾ initial film은 평면의 형태이기 때문에 두께에 따른 일정한 굴절율을 나타내지만 광학필름 표면에 증착된 Moth-eye 구조의 원뿔 형태로 인해 입사광 투과에 따라 굴절율이 연속적으로 변화하며, 그 결과 반사율이 감소되어 투과율이 증가된다, 이는 기존에 보고된 Moth-eye 패턴 형성에 따른 투과도 향상 결과와 일치한다.^{5,6)}

이러한 2종류의 광학필름을 이용하여 커버 글래스 후면 및 PERC 태양전지 전면에 위치한 봉지재 사이에 삽입된 형태의 동일 구조의 태양전지 모듈을 제작하였으며 광학적인 효과에 따른 효율 및 출력의 개선 정도를 확인

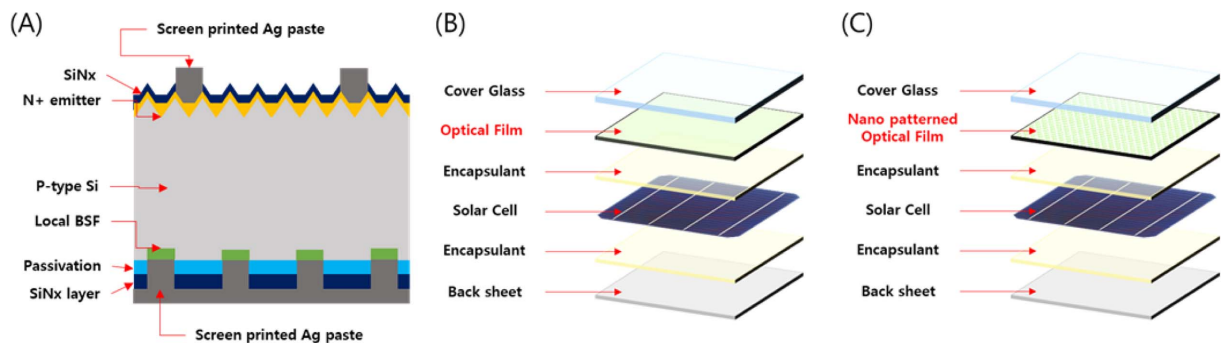


Fig. 2. Structure of PERC solar cells and modules (A) SiO_2 -Free ARC layer of PERC solar cells structure, (B) Initial optical film embedded 1-cell photovoltaic mini-modules (C) Moth-eye nano structure film embedded 1-cell photovoltaic mini-modules.

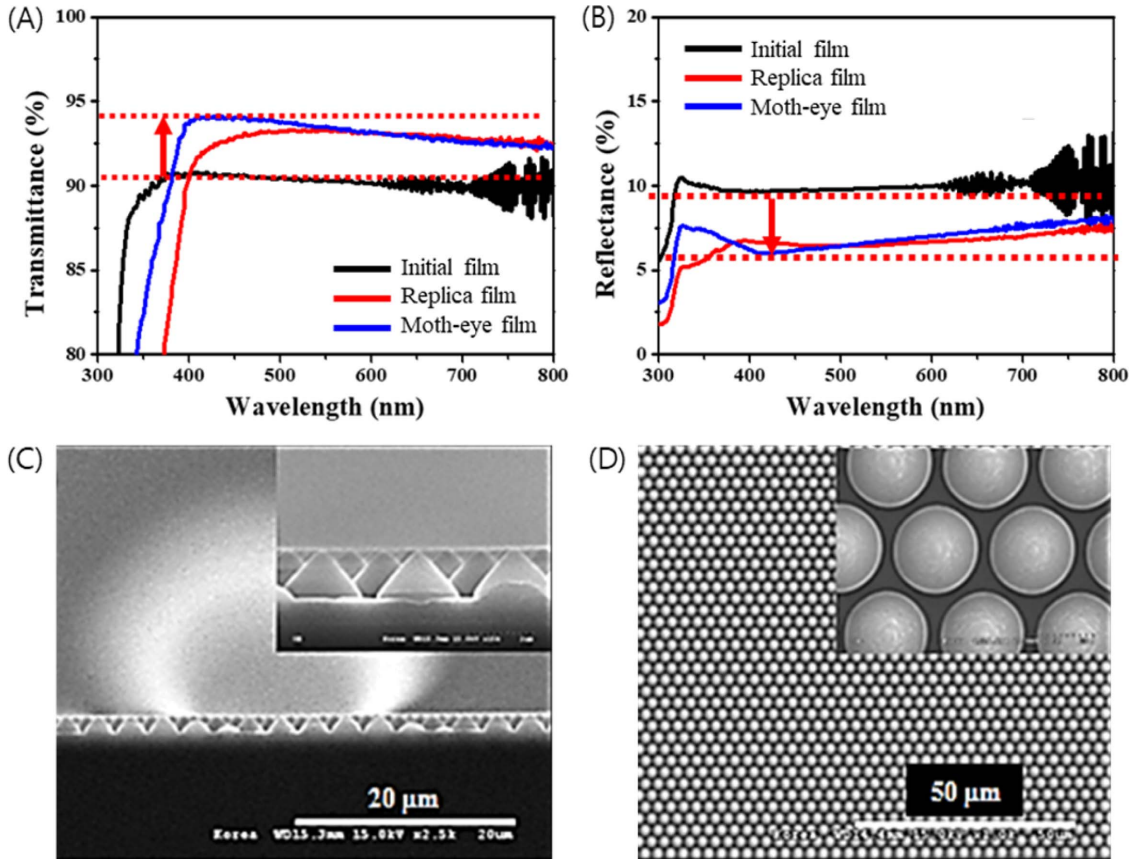


Fig. 3. Moth-eye nano structure film of optical characteristics and SEM image (A) Transmittance, (B) Reflectance, (C) Cross-section SEM image, (D) Top-view SEM image.

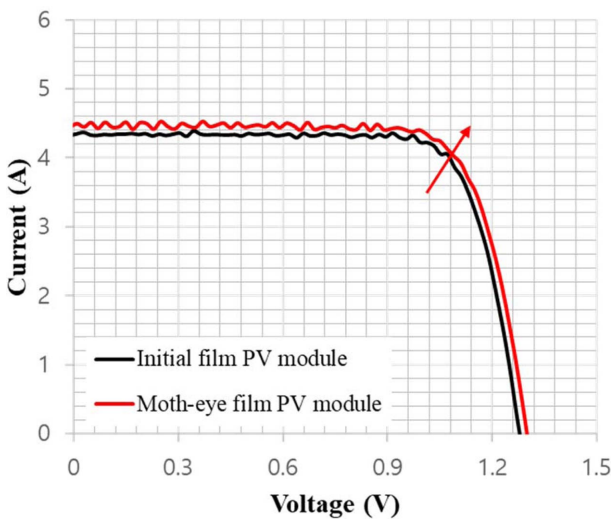


Fig. 4. Light I-V analysis of Initial film and Moth-eye film embedded PV modules.

하기 위하여 AM 1.5G의 1 Sun 환경의 Solar simulation 분석을 하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. initial film이 삽입된 PERC 태양전지 1-Cell 미니 모듈은 효율이 17.68%이며 출력이 4.34 W이고 Moth-eye film이 삽입된 미니 모듈은 효율이 18.12%이며 출력이 4.45 W로 initial film 기준으로 효율 및 출력이 2.5% 증가하였다. 이는 Table 1의

Table 1. Parameter value of Light I-V curve analysis (Film embedded PV modules)

Sample name	Voc (V)	Isc (A)	F.F (%)	Eff (%)	Pmax (W)
Initial film PV module	1.28	4.34	78.29	17.68	4.34
Moth-eye film PV module	1.30	4.47	76.69	18.12	4.45
Rate (%)	+1.56	+2.99	-2.04	+2.52	+2.52

태양전지 효율 파라미터와 같이 initial film의 단락전류 (short-circuit current, I_{sc})는 4.34A이며 Moth-eye film의 I_{sc} 는 4.47A로 initial film 기준으로 2.99% 향상되어 효율 및 출력이 개선됨을 알 수 있다. 이는 필름의 광학 특성 향상의 결과로 해석할 수 있다. Moth-eye film의 투과율은 initial film보다 4% 증가하였고 반사율은 4% 감소하였기 때문에 식 (1)에서와 같이 Moth-eye film 삽입된 모듈의 태양전지 셀에서의 흡수(Absorbance)가 상대적으로 증가하였다. 즉, Moth-eye 구조로 인해 입사광의 광학적인 손실이 개선됨으로써 태양전지에 도달하는 Photons이 증가하게 되며, 식 (2)와 같이 전체 스펙트럼에서 주어지는 Photons에서 생성되는 electron의 증가로 외부양자효율 (EQE)의 개선되어 식 (3)과 같이 단락전류밀도(short-circuit current density, J_{sc})가 증가됨을 알 수 있다. 그 결과 식 (4)와 같이 태양전지의 변환효율(Efficiency)이 증가

됨을 알 수 있다.

$$Absorbance(\alpha) = 1 - T - R \quad (1)$$

$$EQE = \frac{electrons \cdot s^{-1}}{photons \cdot s^{-1}} = \frac{current/s}{total\ photon\ power/hv} \quad (2)$$

$$Jsc = q \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \phi(\lambda) \cdot EQE(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$Conversion\ Efficiency(\eta) = \frac{Voc \cdot Iss \cdot FF}{P_{input}} \quad (4)$$

또한, Moth-eye film이 삽입된 태양전지 모듈은 PID 열화에 따른 출력 저하 현상이 개선됨을 알 수 있다. Fig. 5는 셀 단위 PID 시험에 따른 분석 결과이다. 셀 단위 PID 시험방법은 IEC-62804 규격의 모듈 시험방법에 기초하며 2014년부터 Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics (CSP)에서도 시행중인 시험분석 방법이다.²⁰⁾ 구리(Cu) 플레이트 상단에 태양전지(SiO₂-Free PERC Solar Cell), EVA, Moth-eye film, 커버 글래스 순으로 적층 하였으며 유리 상단에는 2.5 kg의 구리 무게 추를 배치하였다. 하단의 플레이트는 60°C의 온도로 유지되며 +1,000 V가 인가되었고, 상단의 무게 추에는 -1,000 V를 인가 하여 전위차를 발생시켰으며 96시간 동안 유지하여 PID 열화 가속 시험을 진행 하였다. Fig. 5의 (A)는 시험 전, 시험 후의 Light I-V 측정 결과이며 PID 시험 전 셀 단위 PERC 태양전지의 초기 효율은 19.76%이다. Moth-eye film이 적층 되지 않은 태양전지는 PID 시험 후 효율이 초기 효율

대비 6.3% 감소한 13.44% 이나 Moth-eye film이 적층 된 태양전지는 초기 효율 대비 0.6% 만 감소된 19.16% 으로 PID 열화현상으로 인한 출력 저하 방지에 효과적임을 확인 하였다. 이는 Fig. 5의 (B)에서의 Dark I-V 분석 결과에서도 동일하게 확인 가능하였다. 암(Dark)상태에서 전압(Voltage)에 따른 전류(Current)를 측정하였고 이를 log(current)-voltage스케일로 변환하였을 때 낮은 전압 영역에서는 R_{sh} 의해서 전체 전류가 지배적으로 영향을 받기 때문에 누설 전류를 확인할 수 있다.^{13,14)} 이러한 커브를 Shockley diode equation 및 Kirchhoff's voltage rule을 통해 변환하여 R_{sh}의 값을 도출하였을 때¹⁵⁻¹⁷⁾ 19.76%의 초기 효율 값인 PERC 태양전지의 R_{sh}는 777.1 ohm이며, Moth-eye film이 적용되지 않은 태양전지는 3.075 ohm 이다. 하지만 Moth-eye film이 적용된 태양전지는 96시간 PID시험 이후 67.26 ohm으로 R_{sh}가 증가함을 확인 가능하였다. 이러한 결과는 태양전지용 커버글래스에 있는 Na⁺ 이온이 낮은 체적 저항을 가지는 EVA의 특성으로 인해 확산 및 투과되어 PERC 태양전지 표면의 ARC레이어의 SiN_x에 축적된다. 그 결과 PERC 태양전지 표면 ARC레이어 및 N-type 에미터 층에 Shunting path가 발생되어 PID-s 메커니즘과 동일한 출력 저하 현상이 나타난다.¹⁸⁾ 이상적인 태양전지는 등가회로 상 R_{sh}가 무한대이어야 내부 누설전류가 없으나, R_{sh}가 감소하였을 때 입사된 Photon들이 광 흡수층을 통해 electron으로 변환되지만 태양전지 내부의 누설 전류로 인해 전면 및 후면 전극을 통해 효과적으로 빠져나가지 못하기 때문이다. 그러나 Moth-eye film이 커버 글래스 후면 및 봉지재 사이에 적용 되었을 때는 R_{sh}가 증가함으로써 효과적으로 Na⁺ 이온의 확산 및 투과가 차단 되어 출력 저하 현상을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Parameter value of Light I-V curve analysis (Cell-level PID tested)

Sample name	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	F.F (%)	Eff (%)	Rsh (ohm)
Initial state	0.658	40.72	73.70	19.76	777.1
w/o Moth-eye film	0.645	39.40	52.90	13.44	3.075
With Moth-eye film	0.659	40.28	72.20	19.16	67.26
Rate(%)	+2.17	+2.23	+36.48	+42.56	+2087.32

4. Conclusion

본 연구에서는 NIL 방식으로 증착된 Moth-eye film이

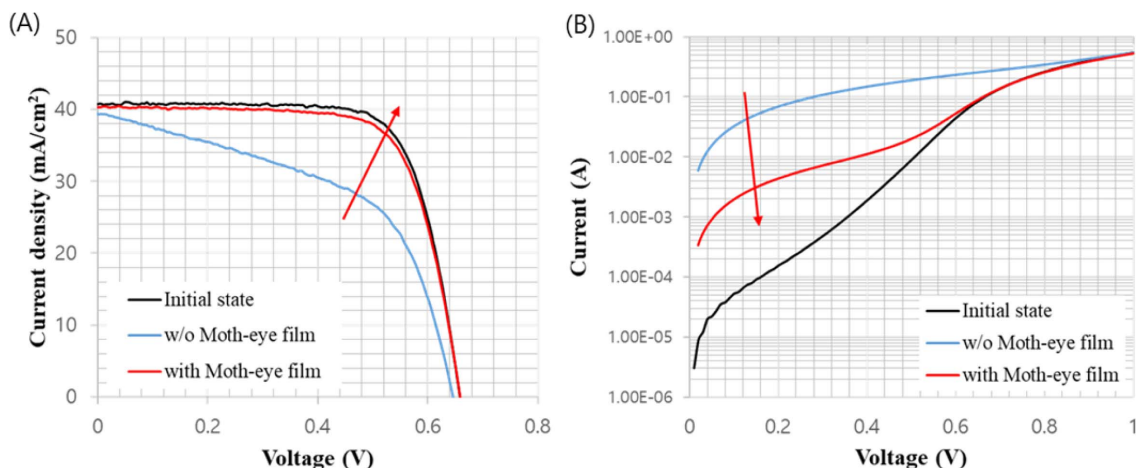


Fig. 5. Cell-level PID acceleration test result based on IEC 62804-1 standard (A) Light I-V analysis (B) Dark I-V analysis

적용된 PERC 태양전지 모듈을 제작하였고, PID열화현상을 방지함으로써 출력저하를 개선하였다. Moth-eye film은 원뿔형 구조가 6각형 모양으로 광학 필름 표면에 일정하게 배치된 형태이다. 400~800 nm의 범위에서의 투과율이 4% 향상되었으며 PERC 태양전지 모듈에 적용하였을 때 I_{sc} 가 4.47A로 2.99% 향상되었고 출력이 4.45 W로 2.52% 향상되었다. 또한 셀 단위 PID 가속열화시험을 진행하였을 때 Moth-eye film이 적용되지 않은 태양전지는 PID열화 현상으로 인해 초기 효율 19.76%에서 13.44%로 감소 하였으나 Moth-eye film이 적용된 태양전지는 19.16%로 PID열화율이 42.5% 감소 되었다. 이러한 결과는 Moth-eye 나노패턴을 광학 필름에 적용하여 투과율이 개선됨을 알 수 있으며, PERC 태양전지 모듈 커버 글라스 후면 및 봉지재 사이에 적용함으로써 효과적으로 PERC셀의 흡수 효율을 증가시켜 출력이 개선됨을 알 수 있었다. 또한 커버글라스의 Na^+ 이온을 효과적으로 차단함으로써 PID현상으로 인한 R_{sh} 감소하여 shunting path가 발생되는 것을 방지하여 셀 내부의 누설 전류를 차단하고, 그 결과 효율 및 출력 저하 현상이 효과적으로 개선됨을 알 수 있었다.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20193020010390); and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20183010014320).

References

1. NREL Best Research-Cell Efficiencies, NREL. (2020) from <http://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
2. W. Oh, S. Bae, D. Kim, and N. Park, "Initial detection of potential-induced degradation using dark I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules in the outdoors", *Microelectronics Reliability*, 88, 998 (2018).
3. W. Luo, P. Hacke, S. M. Hsian, Y. Wang, A. G. Aberle, S. Ramakrishna, and Y. S. Khoo, "Investigation of the impact of illumination on the polarization-type potential-induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(5), 1168 (2018).
4. B. J. Bae, S. H. Hong, E. J. Hong, H. Lee, and G. Y. Jung, "Fabrication of moth-eye structure on glass by ultraviolet imprinting process with polymer template", *Japanese Journal of Applied Physics*, 48(1R), 010207 (2009).
5. K. S. Han, J. H. Shin, and H. Lee, "Enhanced transmittance of glass plates for solar cells using nano-imprint lithography", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(3), 583 (2010).
6. J. W. Leem, X. Y. Guan, M. Choi, and J. S. Yu, "Broadband and omnidirectional highly-transparent coverglasses coated with biomimetic moth-eye nanopatterned polymer films for solar photovoltaic system applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 134, 45 (2015).
7. K. S. Han, H. Lee, D. Kim, and H. Lee, "Fabrication of anti-reflection structure on protective layer of solar cells by hot-embossing method", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(8), 1214 (2009).
8. S. Ju, J. Y. Choi, D. Chae, H. Lim, H. Kang, and H. Lee, "Fabrication of high-transmittance and low-reflectance meter-scale moth-eye film via roll-to-roll printing", *Nanotechnology*, 31(50), 505301 (2020).
9. K. S. Oh, S. H. Bae, K. J. Lee, D. H. Kim, and S. I. Chan, "Mitigation of potential-induced degradation (PID) based on anti-reflection coating (ARC) structures of PERC solar cells", *Microelectronics Reliability*, 100, 113462 (2019).
10. K. S. Oh, M. Byun, M. Kim, Y. D. Kim, K. Kim, D. Huh, and H. Lee, "Hexagonal array micro-convex patterned substrate for improving diffused transmittance in perovskite solar cells", *Thin Solid Films*, 660, 682 (2018).
11. P. B. Clapham and M. C. Hutley, "Reduction of lens reflexion by the "Moth Eye" principle", *Nature*, 244(5414), 281 (1973).
12. E. J. Hong, K. J. Byeon, H. Park, J. Hwang, H. Lee, K. Choi, and G. Y. Jung, "Fabrication of moth-eye structure on p-GaN layer of GaN-based LEDs for improvement of light extraction", *Materials Science and Engineering: B*, 163(3), 170 (2009).
13. G. K. Chang, Y. K. Lim, and J. C. Jeong, "Textured Surface Epitaxial Base Silicon Solar cell", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 10(2), 33 (2003).
14. K. R. McIntosh and C. B. Honsberg, "The Influence of Edge Recombination on a Solar Cell's IV Curve", *Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC)*, Australia, 2052 (2000).
15. E. L. Meyer, "Extraction of Saturation Current and Ideality Factor from Measuring Voc and Isc of Photovoltaic Modules", *International Journal of Photoenergy*, 2017, 8479487 (2017).
16. I. Martil and G. Diaz, "Determination of the dark and illuminated characteristic parameters of a solar cell from I-V characteristics", *Eur. J. Phys.*, 13, 193 (1992).
17. J. Zhao, A. Wang, X. Dai, M. A. Green, and S. R. Wenham, "Improvements in Silicon Solar Cell Performance", *Proc. 22nd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Las Vegas, NV, USA, 399, IEEE (1991).
18. V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, and C. Hagendorf, "Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 383 (2014).
19. D. W. Jung, K. S. Oh, E. Jang, S. I. Chan, and S. W. Ryu, "Thickness Effect of SiO_x Layer Inserted between Anti-Reflection Coating and pn Junction on Potential-Induced Degradation (PID) of PERC Solar Cells", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26(3), 75 (2019).
20. S. Yamaguchi and K. Ohdaira, "Degradation behavior of crystalline silicon solar cells in a cell-level potential-induced degradation test", *Solar Energy*, 155, 739 (2017).
21. H. Tanaka and K. S. Kim, "Reliability Evaluation for Photovoltaic Modules", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 1 (2012).