

측면입사광에 대한 SiO_x 무반사 회절격자 결합 c-Si PV 서브-모듈의 광전변환효율 향상

심지현, 김제하^a

청주대학교 에너지융합학과

Improvement of Solar Conversion Efficiency in a c-Si PV Sub-Module Integrated with SiO_x Anti-Reflection Grating for Oblique Optical Irradiation

Ji-Hyun Shim and Jeha Kim^a

Department of Energy Convergence Engineering, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received February 10, 2017; Revised March 16, 2017; Accepted March 20, 2017)

Abstract: We fabricated 1-D and 2-D diffraction gratings of SiO_x anti-reflection (AR) film grown on a quartz substrate and integrated them into a c-Si photovoltaic (PV) submodule. The light-trapping effect of the resulting submodules was studied in terms of the oblique optical incident angle, θ_i . As the θ_i increased, solar conversion efficiency, η , was improved as expected by the increased optical transmission caused by the grating. For $\theta_i \leq 30^\circ$, the relative solar conversion efficiency, $\Delta\eta$, of a 1-D SiO_x ($t=300$ nm) grating, compared to that of a flat SiO_x AR-coated integrated PV submodule, was improved very little, with a small variation of within 2%, but increased markedly for $\theta_i \geq 40^\circ$. We observed a change of $\Delta\eta$ as large as 10.7% and 9.5% for the SiO_x grating of period $t=800$ nm and 1200 nm, respectively. For a 2-D SiO_x ($t=300$ nm) grating integrated PV submodule, however, the optical trapping behavior was similar in terms of θ_i but its variation was small, within $\pm 1.0\%$.

Keywords: Light trapping, SiO_x anti-reflection, Diffraction grating, Oblique optical incident angle, C-Si PV sub-module, Solar conversion efficiency

1. 서론

현재, 태양광 발전은 솔라팜(solar farm)에서 수상태양광 등으로 보급이 확대가 되고 있다 [1,2]. 무엇보다도 중요한 것은 주어진 일사, 기후 및 태양전지(photovoltaic, PV) 환경에서 최대한 전력을 생산하는 것이다. 일반적으로 PV 모듈은 셀을 보호하는 폴리머(EVA, POE) 봉지재와

함께 습기와 기계적 충격(mechanical impact)으로부터 보호하기 위한 저철분 강화유리로 마무리 되어 제작되고 있다. 결정형 실리콘 Si 태양전지는 직달 일사 입사에서 가장 높은 광전변환효율을 얻을 수 있지만 고정형 설치 PV 모듈의 경우 태양광은 일정한 각도를 태양전지에 입사하고 그 각도도 시시각각 변화하게 되어 전력생산에 영향을 주고 있다. 따라서 설치된 PV 모듈에 대하여 전력생산을 높이기 위해서는 모듈에 입사하는 태양광을 손실 없이 흡수하도록 하는 광포획 기술이 필요하다.

가장 단순하며 수동적인 방법은 SiO_x와 같은 반사방지(anti-reflection, AR)박막을 보호 유리 표면에 집적하는 것이다. 이로써 유리면으로부터 광반사를 최소화하

a. Corresponding author; jeha@cju.ac.kr

고 태양전지 셀 내부로 최대한 많은 빛이 입사되도록 하는 것이다. SiOx 코팅 용액을 이용하여 형성한 AR 무반사막 사용 PV 모듈은 AR 무반사막 사용을 하지 않은 모듈에 비하여 약 2%의 상대효율이 향상이 되고 있다 [3].

한편 SiOx 무반사막에 회절격자(diffraction grating)를 형성하면 입사하는 태양광의 투과 특성을 증대할 수 있다는 이론적인 연구가 보고된 바 있다 [4,6]. 서브-마이크론 주기의 회절 격자를 구성하기 때문에 근적외선 영역의 빛에 대하여 광포획 성능이 향상되어 태양전지 효율이 증가하는 효과를 얻을 수 있다 [6]. 결정질 실리콘(c-Si) 태양전지는 직달일사량에서 최대의 효율을 생산하기 때문에 태양의 고도가 높은 한 낮에 발전량이 많고 태양의 고도가 낮은 오전과 오후에 전력 생산이 급격히 감소하고 있다 [7]. 그러나 SiOx 무반사막 회절격자를 집적할 경우 수직 입사로부터 먼 태양광에 대해서도 광포획 효과를 얻을 수 있다. 결과적으로 일일 중 유효 태양광 발전 시간이 늘어나 태양광 발전량을 증대할 수 있다.

본 연구에서는 SiOx 무반사 박막에 나노구조 1-D 및 2-D 회절격자를 형성하고 이를 집적한 PV 서브-모듈을 제작하였다. 이와 같은 무반사 회절격자 집적 PV 모듈을 사용하여 태양광 입사각도의 변화에 따른 광포획을 통한 태양광발전 효율의 향상 효과를 측정하였다. 1-D 및 2-D SiOx 회절격자의 주기와 태양광의 입사각에 따른 c-Si 태양전지의 전환효율 향상에 대한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 Glass 회절격자 제작

본 연구에서는 회절격자를 제작하기 위하여 quartz (SiO₂) 기판 (두께: $t=0.7$ mm)위에 PECVD를 이용하여 SiOx ($t=100$ nm, 150 nm, 300 nm) 박막을 증착하였다. 회절격자 주기는 SiOx의 문헌 조사를 통하여 1D 회절격자의 직달일사에 대한 투과율 향상의 최적 조건으로 중심 회절격자의 주기를 1,100 nm으로 설정하였다 [4]. 본 실험에서는 1-D 및 2-D 회절격자 주기 $T=800$ nm, 1,000 nm, 1,200 nm, 1,600 nm를 제작하였다. 회절격자는 전자선 스텝퍼(electron beam stepper)를 사용하여 제작하였다. 모든 회절격자 주기의 duty

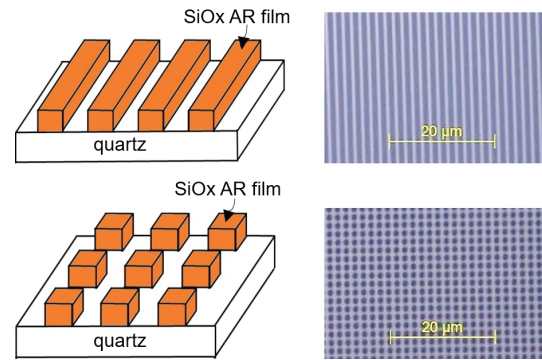


Fig. 1. 1-D and 2-D SiOx gratings/quartz (SiO₂) substrate; schematics (left) and fabricated gratings of $T=1,300$ nm and duty of 50% (right).

는 50%였다. 그림 1은 제작된 1-D 및 2-D의 회절격자를 그림(왼쪽)과 제작된 구조체(오른쪽)이다. 회절격자/SiO₂를 태양전지 구조와 집적하는 위치가 중요한데 본 실험에서는 회절격자면이 전면(front surface), 즉 입사광쪽에 그리고 quartz 뒷면(flat surface)이 태양전지 셀에 접촉하도록 설치하였다.

2.2 회절격자 결합 PV 서브-모듈 및 측정 구도

경사입사하는 태양광에 대한 회절격자 결합 c-Si 모듈의 J-V 특성 변화를 측정하기 위하여 태양전지 (photovoltaic, PV) 서브-모듈을 제작하였다. 그림 2는 c-Si PV 서브-모듈 및 측정에 사용된 회절격자 결합된 태양전지 모듈구도를 보이고 있다. 이 서브-모듈 구성은 상용모듈의 봉지방법에 준하여 제작하였다. 태양전지 셀은 단결정 Si 셀(10×10 mm²)을 사용하였으며, 슬라이드글라스 전면유리판/EVA/단결정 c-Si 태양전지 셀/EVA/Polycarbonate (PC) 후면필름을 순차적으로 적층하고 측정용 리본케이블을 양극 및 음극 전극에 연결한 다음 라미네이션(150°C)을 거쳐 제작하였다. J-V 성능 평가를 위한 회절격자결합을 위하여 SiOx 회절격자(1-D, 2-D)/quartz (SiO₂)와 PV 서브-모듈의 슬라이드글라스 전면유리판 사이에 굴절을 정합용액(index matching fluid)를 삽입하였다.

그림 3은 본 실험에서 사용한 측정구도를 보이고 있다. 솔라시뮬레이터로부터 입사하는 태양광에 대하여 경사 입사각 $0^\circ \leq \theta_i \leq 80^\circ$ 범위에서 변화하였다. J-V 특성 측정하기 위하여 c-Si PV 서브-모듈은 그림 3과

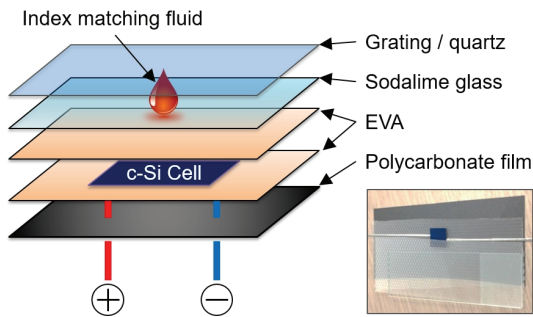


Fig. 2. Schematic of c-Si PV sub-module layout with anti-reflection (AR) grating; the photo of sub-module is shown at the lower right.

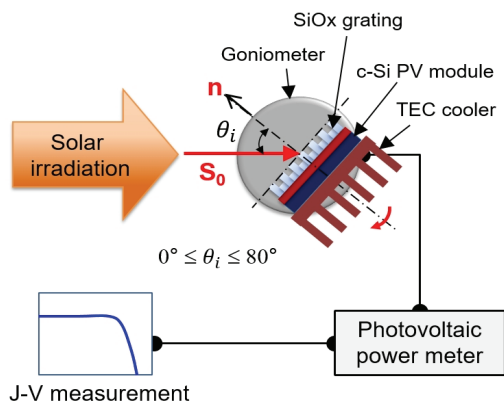


Fig. 3. Schematic Set-up for J-V measurements of PV sub-module.

같이 회전 광학대(goniometer)의 축 중심에 수평하게 설치하였다. 측정 중 c-Si 태양전지 셀의 온도를 25°C 표준조건에 맞추기 위하여 TEC 냉각기를 모듈 후면에 부착하였다. 전 측정 시간 동안(약 80 min.) 셀 온도의 변화량은 $\Delta T \leq \pm 0.8^\circ\text{C}$ 였으며, 이에 대응하는 태양전지의 개방전압의 온도 변화율은 $\Delta V_{oc} \leq 0.0031 \text{ V}/^\circ\text{C}$ 로 유지되었다.

결정형 Si-태양전지는 주로 수직입사광($\theta_i=0^\circ$)에 따라 광전변환 특성이 결정된다. PV 모듈의 총 광전류 I 는 식 (1)에서처럼 입사광 세기에 의한 항 I_L 과 p-n 접합에 의한 다이오드 관계식 항에 의하여 결정된다.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

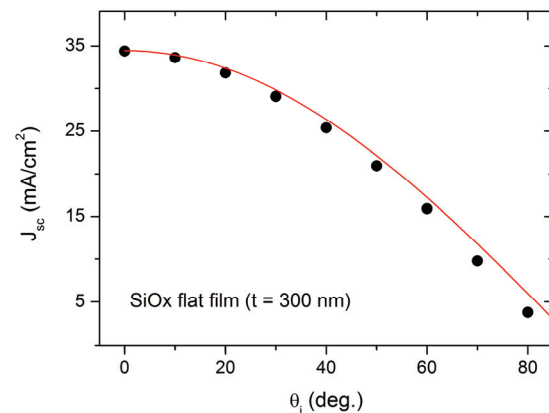


Fig. 4. Photocurrents of a c-Si PV sub-module associated with a SiOx/quartz AR film for solar irradiation at oblique angles.

여기서 q 는 단위 전하량, V 는 전압, n 은 몰수, k 는 볼츠만 상수, 그리고 $T(K)$ 는 절대온도이다. 그림 4는 SiOx ($t=300 \text{ nm}$) 반사방지막/c-Si PV 서브-모듈을 이용하여 경사 입사각도 θ_i 에 따른 광전류의 측정 결과(심볼) 및 $\cos\theta_i$ 의 계산 결과를 보이고 있다. 그림 3에서와 같이 정해진 입사광 S_0 이 각도 θ_i 만큼 기울어져 태양전지에 입사할 경우 태양전지 셀 면의 수직 광성분은 $\langle S_0 \cdot n \rangle / S_0 = \cos\theta_i$ 에 의하여 결정된다. 그림 4는 광전류가 $\cos\theta_i$ 와 매우 잘 일치하는 것을 보이고 있으며, 이는 기울어진 태양전지 셀에 수직 입사하는 유효 태양광량의 세기는 $S_0 \cdot \cos\theta_i$ 로 줄어드는 것을 의미한다. 이 연구에서는 경사각도의 변환을 통하여 태양전지에 수직입사광의 세기를 제어하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 1-D 회절격자 결합 PV 모듈의 J-V 특성변화

측면 입사광에 대한 SiOx 무반사(anti-reflection, AR) 회절격자에 의한 c-Si PV 서브-모듈의 광전류 향상을 그림 3의 측정구도에서 경사각도 θ_i 를 변화하면서 측정하였다. 그림 5는 SiOx 회절격자 박막($t=300 \text{ nm}$, $T=1,200 \text{ nm}$)와 결합한 c-Si PV 서브-모듈의 광전류(a)와 최대점(maximum point, MP) 출력전력(b)을 입사각도 $0^\circ \leq \theta_i \leq 70^\circ$ (또는 입사광의 세기)에 따른 대표 측정결과이다. PV 모듈의 온도는 TEC 냉각기를

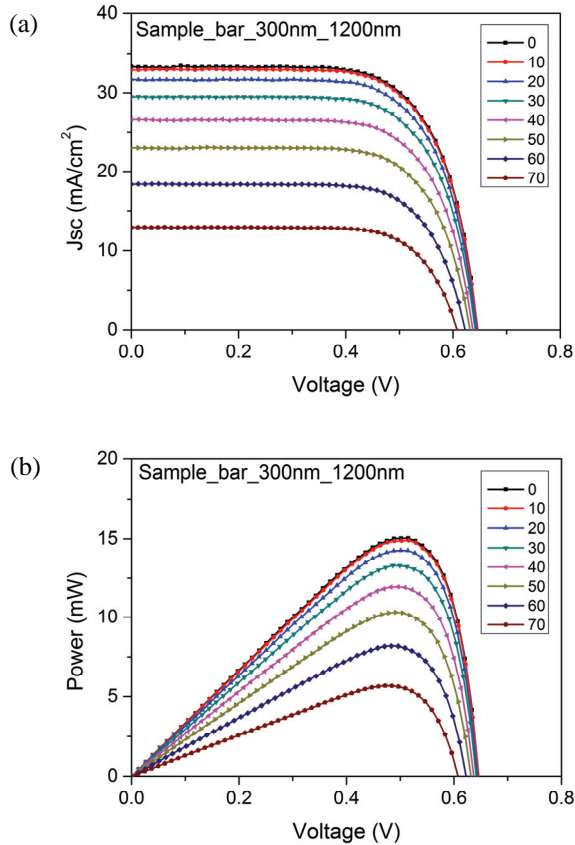


Fig. 5. J-V (a) and P-V (b) of c-Si PV sub-module associated with SiOx grating of $t=300$ nm, $T=1,200$ nm. Cell size= 1 cm².

이용하여 25°C에 유지하였다. 광 입사각이 증가함에 따라 광전류 간격이 커지는 것은 태양전지 입사광의 크기가 $\cos\theta_i$ 에 따라 변화하기 때문이다. 수직 입사광의 크기가 작아짐에 따라(큰 입사각) 생산되는 출력이 비례하여 감소하는 것을 보였다.

그림 6은 1-D SiOx 무반사 회절격자의 주기(T)에 따른 광전변환효율, η 의 변화를 그린 그래프이다. 이 실험에 사용한 회절격자의 SiOx 무반사막은 3종류를 사용하였다: 회절격자 없는 무반사막(■), 회절격자 주기 $T=1,200$ nm (●), $T=1,600$ nm (▲). 입사각이 커짐에 따라 η 은 SiOx 무반사막($t=300$ nm)에 비하여 증가 하였으며, 그 증가폭은 입사각에 따라 커지는 것으로 측정되었다. 회절격자 주기가 $T=1,600$ nm인 시료는 $T=1,200$ nm인 시료에 비하여 η 이 감소하였다.

입사각 변화에 대응하는 회절격자 결합 PV 모듈의 SiOx AR 반사방지막에 대한 상대 광전환효율, $\Delta\eta$ (%)을 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 여기서 $\eta_{GR}(\theta_i)$,

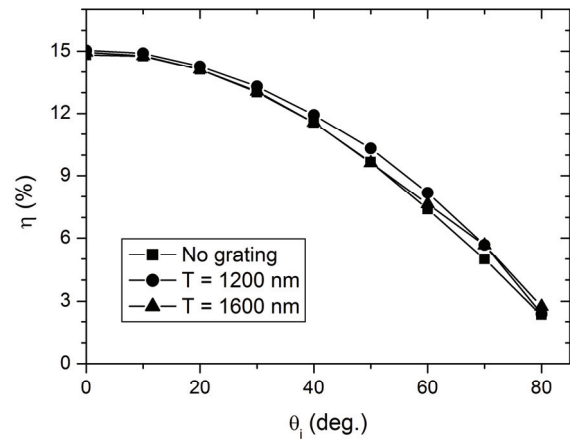


Fig. 6. Solar conversion efficiency, η of PV sub-modules with 1-D AR gratings; SiOx flat film (no grating) (■), period $T=1,200$ nm (●), and period $T=1,600$ nm (▲).

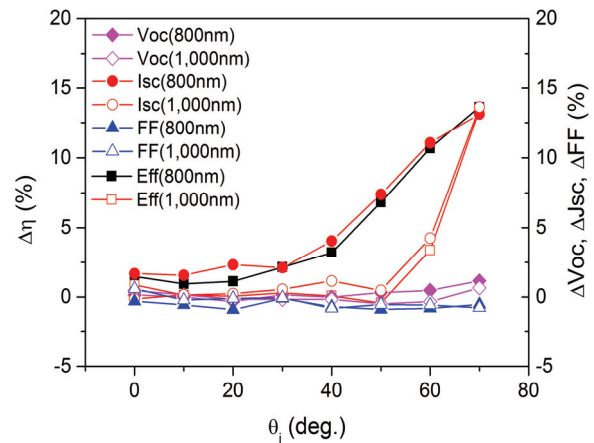


Fig. 7. Relative parameters for a PV sub-module with 1-D SiOx grating with respect to flat SiOx AR film; $\Delta\eta$ (■, □), ΔV_{oc} (◆, ◇), ΔJ_{sc} (●, ○), and ΔFF (▲, △). The closed and open symbols are for $T=800$ nm, $T=1,000$ nm, respectively.

$$\Delta\eta(\theta_i) = \frac{\eta_{GR}(\theta_i) - \eta_{AR}(\theta_i)}{\eta_{AR}(\theta_i)} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$\eta_{AR}(\theta_i)$ 은 각각 SiOx 회절격자(GR)와 무반사(AR) 박막과 결합한 PV 모듈로부터 입사각 θ_i 에서 측정된 광전 변환효율을 의미한다. 마찬가지로 ΔV_{oc} , ΔJ_{sc} , ΔFF 를 정의하였다.

그림 7은 SiOx ($t=300$ nm) 회절격자의 주기 $T=800$ nm, 1,000 nm의 회절격자에 대한 c-Si PV 모듈의 $\Delta\eta$, ΔV_{oc} , ΔJ_{sc} , ΔFF 의 변화를 측정된 결과이다. 입사

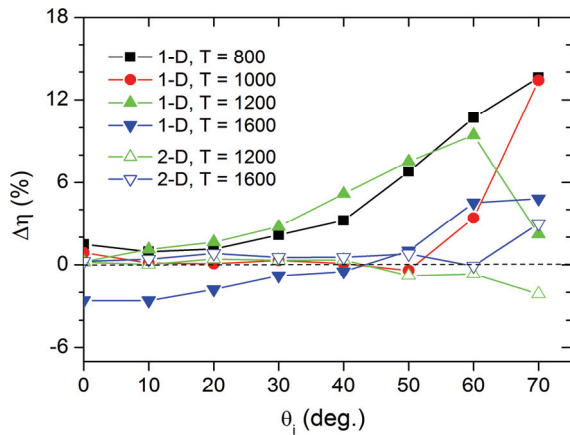


Fig. 8. $\Delta\eta$ variation of 1-D & 2-D SiOx AR gratings ($t=300$ nm) for various periods (T).

각, θ_i 이 증가함에 따라 ΔV_{OC} , ΔFF 는 $\pm 0.5\%$ 이내의 일정한 값을 나타낸 반면, 광전류 ΔJ_{SC} , $\Delta\eta$ 는 $\theta_i \geq 40^\circ$ 에서 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. $\theta_i = 60^\circ$ 에서 SiOx 회절격자의 주기 $T=800$ nm 와 $T=1,000$ nm에서 각각 $\Delta\eta = 10.7\%$, 3.4% 까지 증가하였다.

그림 8은 1-D 및 2-D SiOx ($t=300$ nm) 회절격자의 주기(T) 변화에 따른 입사각 θ_i 에 대한 광전환효율, $\Delta\eta$ 의 변화율을 나타낸 그래프이다. 회절격자가 집적된 PV 모듈에서 광전환효율, η 은 입사각, θ_i 가 증가할 때 같이 향상되었다. $\theta_i \leq 30^\circ$ 에서 $\Delta\eta$ 는 2%이내에서 변화를 보였으며, 1-D 회절격자 주기 $T=1,600$ nm에서는 오히려 $< -2\%$ 을 보였다. 경사각도 θ_i 에 의한 회절격자의 효과는 $\theta_i \geq 40^\circ$ 에서 급격하게 증가하였다. $\theta_i \leq 60^\circ$ 에서 SiOx 회절격자의 주기 $T=800$ nm와 $T=1,200$ nm에서 각각 $\Delta\eta=10.7\%$, 9.5% 까지 증가하였다. 이와 같은 결과는 c-Si PV 서브-모듈에 입사되는 광량의 향상에 의한 것이다(그림 7). 즉, SiOx 회절격자와 결합한 태양전지 모듈은 수직방향으로 입사하는 태양광에는 광포획의 효과는 $\leq 2\%$ 로 크게 향상되지 않으나, 입사각이 커질 때($\theta_i \geq 40^\circ$) 그 효과가 현저하게 증가하였다. 한편, 회절격자주기 $T=1,600$ nm인 경우, 회절격자에 의한 광포획 특성은 감소하였다.

3.2 2-D 회절격자 결합 PV 모듈의 J-V 특성변화

그림 9는 2-D SiOx 무반사 회절격자의 주기 T 에 따른 광전변환효율, η 의 변화를 그린 그래프이다. 그

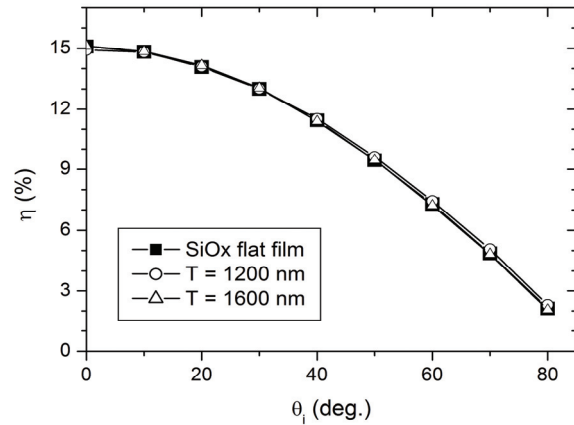


Fig. 9. Solar conversion efficiency, η of PV sub-modules with 2-D AR gratings; SiOx flat film (no grating) (■), period $T=1,200$ nm (○), and period $T=1,600$ nm (△).

림 6의 실험에서와 같이 SiOx 무반사막($t=300$ nm)의 3종류 회절격자를 사용하였다; 회절격자 없는 무반사막(■), 회절격자 주기 $T=1,200$ nm (○), $T=1,600$ nm (△). 그림 6과 달리 2-D 회절격자구조는 1-D 회절격자구조에 비하여 광전변환효율의 향상이 $\theta_i \leq 50^\circ$ 에서 거의 나타나지 않았으며, 또한 회절격자 주기의 차이에 의한 효과도 관측되지 않았다. 그렇지만 입사각의 변화에 따른 1-D 및 2-D 회절격자의 광전변환효율에 변화경향은 동일한 것으로 관측되었다.

그림 8에서 입사각 θ_i 가 증가할 때 2-D SiOx 회절격자에 의한 광전변환효율의 효과는 전반적으로 1-D의 것과 유사하였으나, 상대 변화율이 $\pm 1.0\%$ 이하로 매우 작았다. 이와 같이 2-D 회절격자 무반사 코팅막에서 효율 증가가 오히려 1-D의 경우보다 작아진 것은 1D, 2D 회절격자 보다는 2-D 회절격자의 SiOx 박막 면적이 식각에 의하여 1-D 회절격자 보다 2배 증가되어 무반사 효과가 감소하였기 때문으로 판단된다 [8].

4. 결론

본 연구에서 SiOx 박막 회절격자가 집적된 c-Si PV 서브-모듈의 경사 입사광의 세기변화에 따른 광포획 효과를 관찰하였다. 회절격자가 집적된 PV 모듈에서 광포획에 의한 광전환효율, η 은 입사각, θ_i 가 증가할 때 같이 향상되었다. 1-D SiOx ($t=300$ nm) 회절격자

는 $\theta_i \leq 30^\circ$ 에서 Δn 은 2% 이내의 작은 변화를 보인 반면, $\theta_i \geq 40^\circ$ 에서 급격하게 증가하였다. $\theta_i \leq 60^\circ$ 에서 SiO_x 회절격자의 주기 $T=800$ nm 와 $T=1,200$ nm에서 각각 $\Delta n=10.7\%$, 9.5% 까지 증가하였다. 한편 입사각의 변화에 따른 2-D SiO_x (t=300 nm) 회절격자의 광포획 효과는 1-D의 결과와 유사한 추세를 보였으나 상대 변화율이 $\pm 1.0\%$ 이하로 아주 작게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 청주대학교 대학원 연구장학금으로 지원되었음.

REFERENCES

- [1] Report IEA PVPS T1-26:2015, *A Snapshot of Global PV: 1992-2014*, http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report (2015).
- [2] Y. K. Choi, *Int. J. Soft. Eng. Appl.*, **8**, 75 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.14257/ijseia.2014.8.1.07>]
- [3] K. H. Nielsen, D. K. Orzol, S. Koynov, S. Carney, E. Hultstein, L. Wondraczek, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cell.*, **128**, 283 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.034>]
- [4] R. Dewan and D. Knipp, *J. Appl. Phys.*, **106**, 074901 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3232236>]
- [5] T. K. Chong, J. Wilson, S. Mokkaapati, and K. R. Catchpole, *J. Opt.*, **14**, 024012 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/14/2/024012>]
- [6] J. Gjessing, E. S. Marstein, and A. Sudbo, *Opt. Expr.*, **18**, 5481 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.005481>]
- [7] J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 847 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.12.847>]
- [8] S. Saravanan, R. S. Dubey, S. Kalainathan, M. A. More, and D. K. Gautam, *AIP Adv.*, **5**, 057160 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4921944>]