≪연구논문≫ 한국진공학회지 제21권 1호, 2012년 1월, pp.62~68
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2012.21.1.62

광 입사각이 BIPV에 적용되는 단결정 또는 비정질 실리콘 태양전지의 양자효율에 미치는 영향

강정욱[a] · 손찬희[a] · 조광섭[a] · 유진혁[b] · 김정식[b] · 박창균[b] · 차성덕[c] · 권기청[a]*

[a]광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701
[b]주성 엔지니어링, 광주 464-892
[c]원우 시스템즈, 서울 156-759

(2011년 12월 1일 받음, 2012년 1월 19일 수정, 2012년 1월 24일 확정)

건재 일체형 태양광발전(BIPV) 응용을 위해 광 입사각에 따른 태양전지의 변환 효율은 중요하다. 양자효율은 태양전지의 파장별 전자 수집효율을 말하며, 입사각별 양자효율 측정으로 입사각에 따른 태양전지 출력 변화 요인을 분석할 수 있다. 이러한 입사각별 양자효율은 태양전지 종류에 따라 차이를 보인다. 본 연구에서는 가장 많이 쓰이는 벌크형 단결정 실리콘 태양전지와 박막형 비정질 실리콘 태양전지의 입사각별 양자효율을 비교하였다. 그 결과, 단결정 실리콘 태양전지에서는 광 입사각이 증가함에 따라 전 파장영역에서 양자효율이 감소했다. 반면, 비정질 박막 실리콘 태양전지에서는 단파장 영역에서는 결정질 실리콘과 동일하게 감소하였으나, 그 이후의 흡수 영역에서 약 40°의 입사각까지 증가 또는 일정한 양자효율을 보이다가 이후에 급격히 감소하는 결과를 얻었다. 이는 비정질 박막 실리콘 태양전지에서 입사각이 증가함에 따라 특정 파장 영역에서 산란과 박막 구조의 영향으로 예상된다. 따라서, 태양전지의 구조 및 광학 구조 최적화 등으로 BIPV 적용에 유리한 구조 태양전지 제작이 가능할 것으로 보인다.

주제어 : 실리콘 태양전지, 반사방지막, 텍스쳐, 입사각, EQE, 건재 일체형 태양광발전

I. 서 론

최근 계속되는 유가 상승으로 인해 차세대 에너지원으로 태양광 발전이 각광받고 있다. 현재에는 주로 태양광 발전소로서 사용되고 있으나 점차 일반 가정으로 영역을 넓혀가고 있다. 특히 건축물의 외벽, 지붕자재, 창문 등과 태양광발전시스템을 통합한 건재 일체형 태양광 발전(BIPV)으로 연구개발이 활발하게 진행 중이다. 일반적으로 태양광 발전은 해당 지역의 태양의 고도에 따라 정남 방향으로 설치된다. 고정형 설치인 경우 태양이 동쪽에서 서쪽으로 이동하면서 태양전지에 입사되는 태양광의 입사각이 변화되고 태양전지 출력이 감소된다. 따라서 광 입사각에 의한 광학적 손실은 하루 중 발전 가능한 시간에 영향을 주어 태양광 발전량을 감소시킨다.

이러한 입사각별 광학적인 손실은 태양전지의 종류나 구조에 따라 다르게 나타난다. 벌크형 실리콘 태양전지는 현재 시장에서 가장 많이 사용되는 태양전지이다. 벌크형 실리콘 태양전지의 광특성은 비교적 간단한 태양전지 구조 때문에 입사각별 광특성 변화 예측이 쉽다. 주된 입사각별 광학적 손실 요인은 입사광의 세기와 표면 반사율이다. 고정 설치된 태양전지에서 광 입사각에 따른 빛의 세기는 제어할 수 없는 부분이다. 반면 표면 반사율은 개선 가능한 특성으로 광 흡수 증가를 통해 에너지 효율을 증가시킬 수 있다. 반사율 저감은 일반적으로 표면 텍스쳐(texture)와 반사방지막(anti-reflection-coating)을 통해 이루어진다 [1]. 이는, 빛의 광포획(light-trapping)량을 증가시켜 태양전지의 단락 전류밀도(J_{sc}: short circuit current density)를 향상시킬 수 있게 한다 [2-4].

박막형 태양전지는 벌크형 태양전지의 원가에서 큰 비율을 차지하는 실리콘 웨이퍼의 비용을 줄이기 위한 방법으로 연구 개발되고 있다. 박막형 태양전지의 재료는 비정질 실리콘, CIGS, CdTe 등이 있으며 유리 기판이나 플라스틱 기판을 이용하여 제작된다. 박막형 비정질 실리콘 태양전지는 벌크형 실리콘 태양전지 대비 저가이나 다소 출력이

* [전자우편] gckwon@kw.ac.kr

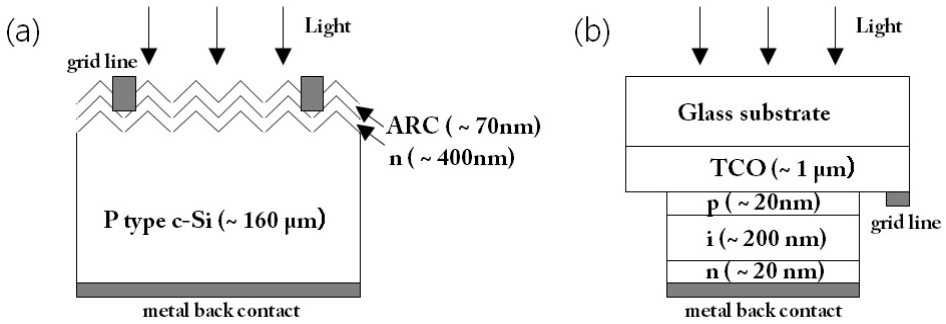

Figure 1. The structure of solar cells. (a) c-Si (Crystalline Silicon) and (b) a-Si:H Amorphous Silicon).

Table 1. Electrical parameters of solar cells.

Samples	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	F.F	Efficiency (%)
c-Si	0.63	36.75	0.75	17.59
a-Si:H	0.89	12.03	0.72	7.7

낮다 [5]. 하지만 입사각에 따른 광학적 손실이 벌크형 대비 적은 특성으로 입사각에 따라 출력에 영향을 많이 받는 건재 일체형 태양광 발전(BIPV) 응용 면에서 유리하다. 일반적으로 박막형 태양전지에서 광포획 효과는 변환 효율 향상에 중요한 역할을 한다. 박막형 태양전지는 전면 투명 전도성 산화막(TCO) 표면에 미세한 불규칙한 텍스쳐를 형성하여 빛을 산란시키며, 얇은 다층 박막 구조에 의해 빛의 간섭 현상이 나타난다. 이러한 박막 태양전지에서 빛의 입사각에 따른 광학적 특성은 벌크형 실리콘 태양전지와 비교하여 다소 복잡하게 변화한다 [6,7].

양자효율은 단파장 빛을 입사시켜 전류를 측정함으로써, 태양전지에 입사된 광자가 전자-정공 쌍으로 변환되는 비율을 알 수 있다. 파장에 따른 광자에너지별 전자 수집효율은 표면 반사율, 표면과 후면의 재결합 영향 등 태양전지의 종합적인 특성들을 유추할 수 있다. 또한, 입사각별 양자효율을 측정하여 파장별 전자수집특성 변화에 따라 태양전지 구조를 설계할 수 있다.

본 연구에서는, 일반적으로 사용되는 단결정 실리콘 태양전지와 비정질 실리콘 박막 태양전지에서 입사각별 양자효율 변화를 분석하였다. 먼저, 각 태양전지 구조에서 광학적 손실에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 분석하고, 입사각에 따른 양자효율을 측정결과와 비교하였다.

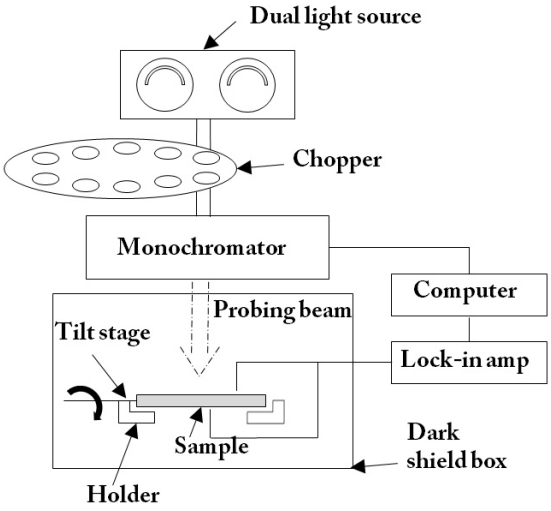

Figure 2. Angular quantum efficiency measurement system.

II. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 일반적인 구조의 p-type 웨이퍼를 기반으로 만든 단결정 실리콘 태양전지(c-Si)와 MOCVD와 PECVD로 유리위에 각각 전도성 투명 산화물(TCO)과 실리콘을 증착하여 만든 비정질 박막 실리콘 태양전지(a-Si:H)를 각 1장씩 제작하여 사용하였다. 그리고 Table 1은 실험에서 사용된 각 태양전지의 전기적 특성이다.

광 입사각에 따른 태양전지 특성은 영향을 미칠 수 있는 표면과 구조를 확인하기 위해서 SEM (scanning electron microscopy)을 사용하였다. 그리고 Fig. 2의 구조를 가지는 광 입사각에 따른 양자효율 측정 장치를 사용하였다. 이 양자효율 측정 장치에서 단파장 및 가시광대에서는 제논램프 광원을 사용하였고, 장파장 영역에서는 할로겐 램프 광원을 사용하였으며, 이 광원의 빛을 chopper로 잘라 만든 AC광원을 단색화 장치로 입사하였다. 그리고 단색화 장치

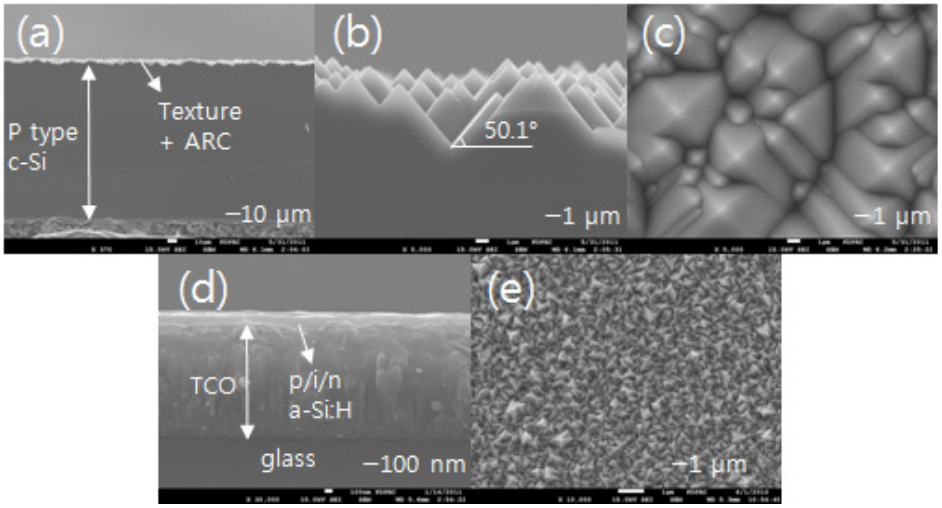

Figure 3. SEM images. (a) c–Si (side), (b) c–Si (surface), (c) c –Si (front), (d) a–Si:H (side), (e) TCO–ZnO:B (front).

를 통해 10 nm 이하의 파장간격으로 나눈 빔을 샘플에 조사하였다. 여기서 조사한 빔의 위치에 따라 Metal grid에 의한 반사와 shading loss로 인한 양자효율 손실이 발생할 수 있기 때문에, 회전축과 grid line이 수직인 방향으로 grid 사이에 빔을 위치하여 이에 대한 영향을 최소화하였다. 그리고 샘플에서의 신호를 Lock-in amplifier를 통해 chopping한 주파수의 신호만을 읽어서, 잡음(noise)을 제거한 SR (spectral response) 및 QE (quantum efficiency)를 기준셀(reference cell)을 이용하여 측정하였다.

측정은 온도 25°C에서 이루어졌으며, 입사각에 따른 양자효율을 측정하기 위해 125×125 mm 크기의 태양전지를 10° 간격으로 회전시킬 수 있는 스테이지를 제작하였다. 그리고 샘플을 고정시키기 위한 플레이트지그와 정확한 측정을 위한 저저항 프로브가 사용되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

Fig. 3(a), (b), (c)는 단결정 실리콘 태양전지 표면 텍스쳐 형상을 보여주는 SEM 사진이다. 단결정 실리콘 태양전지의 표면은 결정방향으로 식각되어 약 50°의 경사를 가진 피라미드 형상의 텍스쳐가 형성되어 있다. 또한 사진에서는 확인되지 않지만 텍스쳐 표면에 반사방지막이 형성되어 있다. 결정질 실리콘 태양전지에서 입사각에 따른 광학적 특성 변화에 영향을 미치는 요인들은 크게 표면 반사율과 태양전지 내부의 흡수 특성 변화이다. 이중 내부 흡수 특성은 주로 장파장 영역에서 영향을 주게 되는데 에미터의 자유전자 흡수 등이 있다. 하지만 웨이퍼 두께 대비 현저히 작은 두께이기 때문에 내부 흡수 특성은 거의 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 입사각에 따른 광특성 변화는 표면에 형성된 텍스쳐와 텍스쳐 표면에 형성된 반사방지막이 주도하게 된다.

비정질 실리콘 박막 태양전지는 Fig. 3(d)와 같이 두께가 1 μm 이하로 얇은 박막들이 적층되어 있으며, 결정질 실리콘 태양전지와 같은 뚜렷한 텍스쳐는 보이지 않는다. 대신 전면 투명전도 산화막(TCO) 표면에 Fig. 3(e)와 같이 불규칙 텍스쳐가 형성되어 있으며 이것이 빛을 산란시켜 광포획 효과를 얻게 된다. 비정질 실리콘 박막 태양전지의 광특성은 주로 TCO 표면의 산란 특성과 적층된 얇은 박막에서 생기는 빛의 간섭 현상에 의해 결정된다. 이러한 광특성은 빛의 입사각 변화에도 역시 다르게 나타난다. 유기 태양전지의 경우 산란도가 거의 없는 투명전극 위에 얇은 유기 박막이 적층된 구조이기 때문에 빛의 입사각에 대한 광특성 변화가 크게 나타나는 경우도 있다 [8].

Fig. 4는 광 입사각에 따른 단결정 실리콘 태양전지와 비정질 박막 실리콘 태양전지의 양자효율 그림이다. Fig. 4(a)에서 단결정 실리콘 태양전지의 그림을 보면 전 파장 영역에서 양자효율의 감소하는데, 각도가 커질수록 감소 비율이 점점 더 커짐을 알 수 있다. 그 반면에, Fig. 4(b)에서 비정질 박막 실리콘 태양전지의 그림을 보면, 광 입사각이 0°에서부터 약 40°까지는 양자효율의 감소비율이 매우 적다가 그 이후에 급격히 떨어짐을 볼 수 있었다.

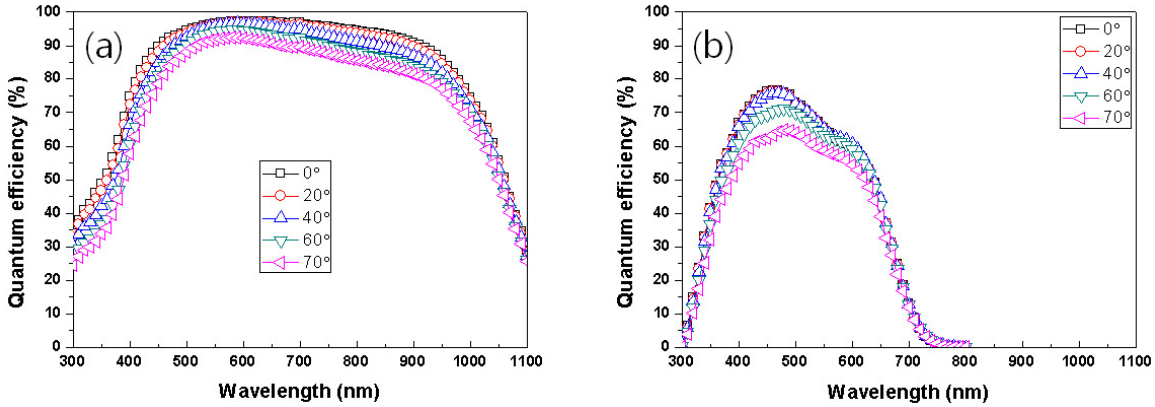

Figure 4. External quantum efficiencies depending on the incident angles. QE of c-Si (a) and a-Si:H (b).

Table 2. Current density (J_{sc}).

Samples	Incident angles (°)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
c-Si (mA/cm^2)	38.02	37.95	37.67	37.28	36.81	36.27	35.63	34.63
a-si (mA/cm^2)	12.03	12.01	12.03	12.04	12.00	11.90	11.47	10.50

실제 입사각에 따른 양자효율 감소로 기인되는 태양전지 변환효율에 대한 영향도를 확인하기 위하여 태양광의 표준 테스트 조건 STC (standard test conditions, AM 1.5 G)의 광원에 대한 단락 전류 밀도(J_{sc})를 계산하였다. 식 (1)은 AM 1.5 G 스펙트럼의 입사광을 기준으로 측정된 양자효율을 곱하여 파장영역 별로 전류밀도를 계산할 수 있는 수식이다 [9].

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} EQE(\lambda) \cdot \frac{q\lambda}{hc} \cdot E_{AM.5G}(\lambda) d\lambda \qquad (1)$$

Table 2는 식(1)을 통해 단결정 실리콘 태양전지와 비정질 박막 실리콘 태양전지의 단락전류밀도를 구한 값이다. 단결정 실리콘 태양전지의 경우 어떠한 별다른 특징 없이 입사각이 최저인 0°에서 38.02 mA/cm^{2}로 가장 높은 전류밀도를 보여주었고, 차츰차츰 입사각이 높아짐에 따라 전류 감소 비율이 커지면서, 최대 70°에서 34.63 mA/cm^{2}의 가장 낮은 전류밀도를 보여주었다. 반면에 비정질 박막 실리콘 태양전지는 입사각이 40°까지는 거의 변화가 없다가 그 이후에 급격히 낮아져, 70°에서 10.5 mA/cm^{2}의 가장 낮은 전류밀도를 나타내었다.

이 두 샘플을 0°~40°까지 전류밀도를 비교해 보면, 단결정 실리콘 태양전지에서는 40°까지 1.21 mA/cm^{2}의 손실을, 비정질 박막 실리콘 태양전지에서는 0.03 mA/cm^{2}의 전류손실을 보임으로써 비정질 실리콘 태양전지가 입사각에 따른 양자효율의 특성이 특정 각도까지는 좋음을 나타내었다. 이것은 셀의 표면 반사율과 셀 구조의 차이로 인하여 광 흡수량이 변화하여 광학적 손실 폭이 다르게 감소한 것으로 보이며, 감소차이를 확실하게 알아보기 위해 아래와 같이 비율적으로 규준화하여 나타내었다.

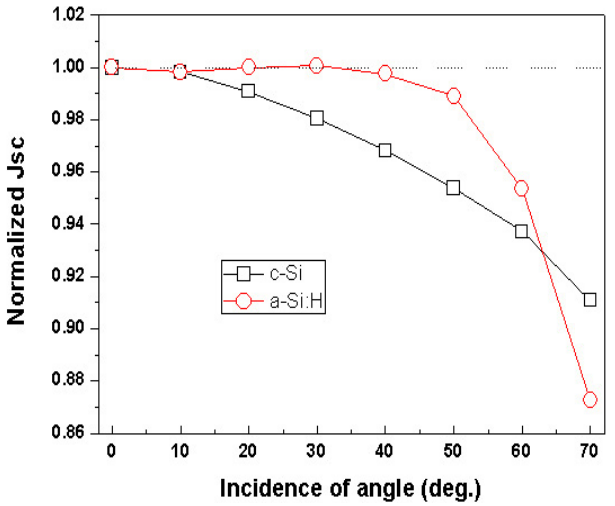

Figure 5. Normalized J_{sc} of incident angle dependence in solar cells.

Fig. 5는 수직광일 때를 기준으로, 입사각이 증가함에

따라 태양전지의 단락전류 감소 비율을 나타낸다. 앞선 결과대로, 단결정 실리콘 태양전지에서는 점차 감소비율이 커짐을 알 수 있고, 비정질 박막 실리콘 태양전지에서는 약 40°까지는 거의 변화가 없다가 그 이후에 급격히 감소함을 알 수 있었다. 그리고 단지 전류 감소비율에서만 본다면, 광 입사각이 약 62° 전에는 비정질 박막 실리콘 태양전지가, 그 이상의 각도에서는 단결정 실리콘 태양전지가 유리한 것으로 보인다.

Fig. 6의 (a), (c)는 광 입사각에 따른 태양전지의 단락전류를 자외선, 가시광선, 근적외선 부분으로 나누어 절대값으로 나타낸 그림이다. 그리고 (b), (d)는 각 영역에서 0° 일때의 단락전류로 규준화하여 입사각에 따라 점점 감소하는 비율을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)을 보면, 단결정 실리콘 태양전지의 경우 가시광선과 근적외선 영역이 대부분의 전류값을 차지하고 있고, 자외선 영역은 거의 전류값에 기여를 하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 (b) 그림을 보면 자외선 영역에서 입사각에 따른 전류 감소율이 가장 크지만, 전체 전류값에서 보면 영향이 적다고 할 수 있다. 반면에 가시광, 적외선 영역에서 차지하는 전류값이 크기 때문에, 단결정 실리콘 태양전지의 경우 이 비율을 따라간다고 할 수 있다.

Fig. 6(c)을 보면, 비정질 박막 실리콘 태양전지의 경우 주로 가시광영역이 전류값에 기여를 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(d)에선 자외선 영역은 입사각이 증가함에 따라 전류감소율은 점점 커졌고, 반면 근적외선 영역은 다소 증가하였다가 감소하였다. 그리고 가시광 영역은 30°까지 근소한 차이로 증가하다가 40° 이후로 감소하였다. 이것은 비정질 박막 실리콘 태양전지가 상대적으로 입사각에 따라 광특성 변화가 크게 나타나는 얇은 박막이 적층된 구조를 가지고 있고, 표면의 미세한 텍스쳐로 빛이 산란되었으며, 광 입사각이 커지면서 빛의 간섭 현상 등으로 특정 파장 길이 이상에서 흡수되는 광의 양이 늘어나기 때문인 것으로

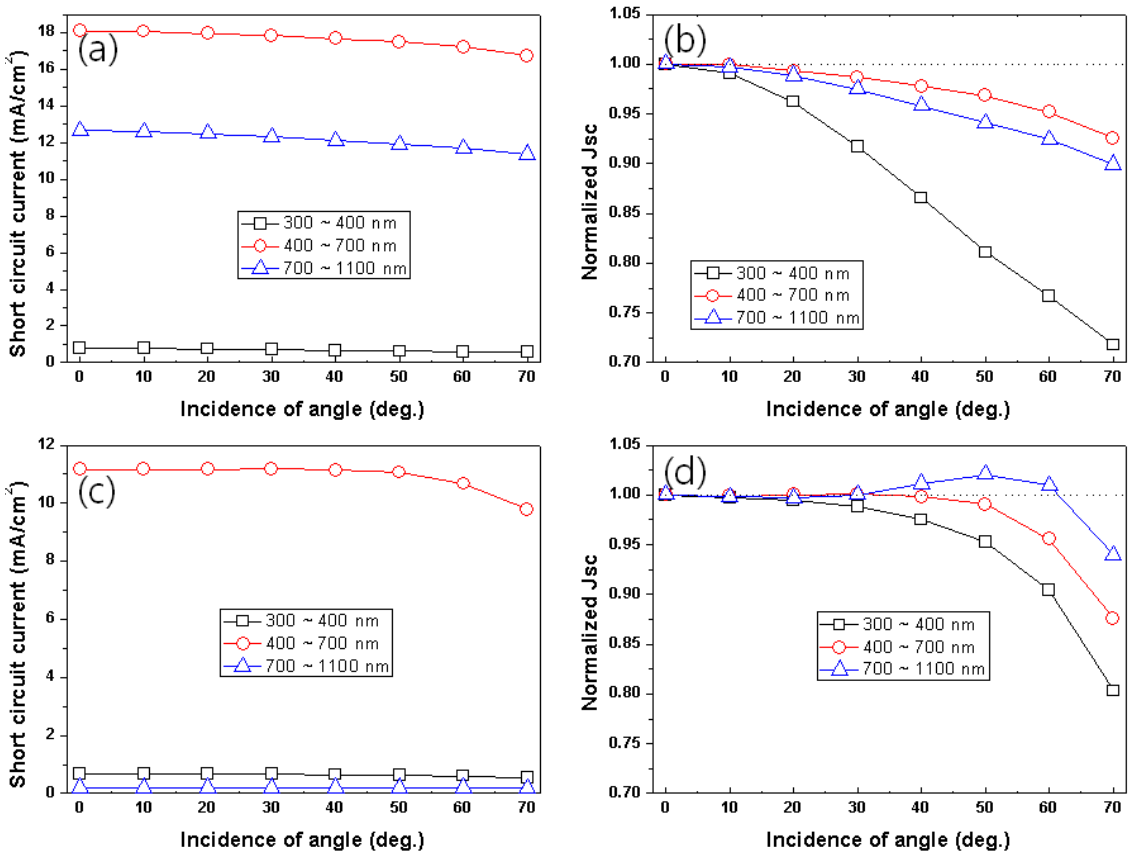

Figure 6. Short circuit current (J_{sc}) of incident angle dependence by the range of wavelength at ultra-violet (300~400 nm), visible (400~700 nm), and near infra-red (700~1,100 nm); (a) J_{sc} of c-Si, (b) Normalize J_{sc} of c-Si, (c) J_{sc} of a-Si:H, (d) Normalized J_{sc} of a-Si.

보인다 [10]. 박막구조 설계 및 산란 특성 조절을 한다면 입사각에 영향을 적게 받는 태양전지 제작이 가능할 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 연구에서는 광 입사각에 따른 단결정 실리콘, 비정질 박막 실리콘 태양전지의 양자효율을 측정하고, AM 1.5 G 대비 단락 전류 밀도의 영향을 살펴보았다. 단결정 태양전지의 경우, 전 파장 영역에서 입사각이 증가함에 따라 양자효율 감소 비율이 점점 커졌고, 비정질 박막 태양전지의 경우, 입사각이 약 40°까지는 거의 변화가 없다가 급격히 양자 효율 감소 비율이 커지는 현상을 보였다. 이 양자효율을 가지고 AM 1.5 G 대비 단락 전류 밀도의 감소를 계산한 결과 약 62° 이전에서 비정질 박막 실리콘 태양전지가 단결정 실리콘 태양전지보다 양자효율 감소 비율에서 유리함을 보였다. 이것을 자외선, 가시광선, 근적외선 영역으로 나누어서 단락 전류 밀도의 영향도를 분석한 결과, 단결정 실리콘 태양전지에서는 가시광선, 근적외선 영역의 전류 밀도의 기여도가 컸으며, 입사각이 증가함에 따라 이 영역의 양자효율 감소 비율이 점차 커지면서 단락 전류 밀도도 떨어짐을 보였다. 반면 비정질 박막 실리콘 태양전지에서는 전류 밀도의 대부분을 차지하고 있는 가시광 영역에서 약 40°의 입사각까지 일정한 양자효율을 보였고, 기여하는 전류 밀도는 낮지만 장파장에서는 오히려 증가 하는 결과를 보이다가 이후에 급격히 감소였다. 이것은 비정질 박막 실리콘 태양전지에서 전면 투명 전도성 산화막(TCO) 표면에 미세한 불규칙 텍스쳐로 빛을 산란시키며, 얇은 다층 박막 구조에 의해 빛의 간섭 현상이 일어나, 벌크형 실리콘 태양전지와 비교하여 광 흡수가 특정 파장에서 다소 늘어났기 때문으로 보인다.

현재까지는 벌크형 태양전지가 박막 태양전지보다 단락 전류의 값이 크고, 효율이 높다. 하지만 박막 태양전지는 적층 등을 통해 효율을 개선하고, 태양전지의 전체 구조 및 기판 등과 같이 광학 구조로 최적화를 한다면, 실제 입사각에 영향을 많이 받는 BIPV에서 결정질 태양전지보다 박막 태양전지를 적용하는 것이 유리하다.

향후, 태양전지 발전 시간별 광 입사각의 관계와 양자효율에 대해서 적용해 볼 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국 지식경제부 신재생 에너지사업과 중소기업청 산학 공동기술개발지원사업, 2011년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] S. Kim, B. H. Kim, and S. H. Lee. EUPVSEC. **22**, 1499 (2007).

[2] D. S. Ruby, S. H. Zaihi, and S. Narayanan. PVSC. **28**, 75 (2000).

[3] Eli Yablonovitch. J. Opt. Soc. Am. **72**, 899 (2004).

[4] D. S. Ruby, S. H. Zaidi, S. Narayanan, B. M. Damiani, and A. Rohatgi. Solar Energy Materials and Solar cells. **74**, 133 (2002).

[5] J. H. Soo, J. H. Kim, and P. S. Heo, Electronics and elecommunications Trends (ETRI, 2009), 136

[6] H. Sai, Y. Kanamori, K. Arafune, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi, Progress in photovoltaic: Research and applications. **15**, 415 (2007).

[7] J. Yoo, K. H. Kim, M. Thamilselvan, N. Lakshminarayn, Y. K. Kim, J. H. Lee, K. J. Yoo, and J. S. Yi. Journal of Physics D: Applied Physics. **41**, 125205 (2008).

[8] G. Dannler, K. Forberich, M. C. Scharber, C. J. Brabec, I. Tomiš, K. Hingerl, and T. Fromherz. Journal of applied physics. **102**, 054516 (2007)

[9] M. Schädel, J. Isenberg, J. Suthues, C. ballif, and G. Gobsch, EUPVSEC. **21**, 336 (2006).

[10] M. Zeman, R. A. C. M. M. van Swaaij, J. W. metslaar, and R. E. I. Schropp, Journal of Applied Physics. **88**, 6436 (2000).

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.21 No.1, January 2012, pp.62~68
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2012.21.1.62

Incident Angle Dependence of Quantum Efficiency in c-Si Solar Cell or a-Si Thin Film Solar Cell in BIPV System

Jeong-Wook Kang[a], Chan-Hee Son[a], Guang-Sup Cho[a], Jin Hyuk Yoo[b], Joung-Sik Kim[b], Chang-Kyun Park[b], Sung-Duk Cha[c], and Gi-Chung Kwon[a]*

[a]*Department of Electrophysics, Kwangwoon university, Seoul 139-701*
[b]*Jusung Engineering, Kwang-Ju 464-892*
[c]*Wonwoo systems, Seoul 156-759*

(Received December 1, 2011, Revised January 19, 2012, Accepted January 24, 2012)

The conversion efficiency of solar cells depending on incident angle of light is important for building-integrated photovoltaics (BIPV) applications. The quantum efficiency is the ratio of the number of charge carriers collected by the solar cell to the number of photons of a given energy shining on the solar cell. The analysis of angle dependence of quantum efficiencies give more information upon the variation of power output of a solar cell by the incident angle of light. The variations in power output of solar cells with increasing angle of incidence is different for the type of cell structures. In this study we present the results of the quantum efficiency measurement of single-crystalline silicon solar cells and a-Si:H thin-film solar cells with the angle of incidence of light. As a result, as the angle of incidence increases in single-crystalline silicon solar cells, quantum efficiency at all wavelength (300～1,100 nm) of light were reduced. But in case of a-Si:H thin-film solar cells, quantum efficiency was increased or maintained at the angle of incidence from 0 degree to about 40 degrees and dramatically decrease at more than 40 degrees in the range of visible light. This results of quantum efficiency with increasing incident angle were caused by haze and interference effects in thin-film structure. Thus, the structural optimization considering incident angle dependence of solar cells is expected to benefit BIPV.

Keywords : Silicon solar cell, Anti-reflection coating, Texture, Incident angle of light, EQE, Building-integrated photovoltaics

* [E-mail] gckwon@kw.ac.kr