

실리콘 태양전지의 피라미드와 반구형 표면 조직화

표대승¹ · 조준환¹ · 홍표환¹ · 이종현¹ · 김봉환² · 조찬섭^{3,+}

Pyramid and Half-Sphere Type of Surface Texturing for Si-Solar Cell

Dae-Seong Pyo¹, Jun-Hwan Jo¹, Pyo-Hwan Hong¹, Jong-Hyun Lee¹, Bonghwan Kim², and Chan-Seob Cho^{3,+}

Abstract

In this paper, we found surface shapes are affected by several parameters of RIE, such as RF power, pressure, temp, and process times. The reflectance of pyramid and half sphere structures show differences among shapes, size, height, and depth of those structures. We made about 1 μ m pyramid and half sphere shapes of silicon surface with RIE. For comparing the reflectance, pyramid and half sphere structures are fabricated with same height. Pyramid structure cell shows higher cell efficiency of 12.5% by 1.1% than one of half sphere structure of 11.4%. The light absorption is more increased through the pyramid structure than half sphere structure.

Keywords : Solar cell, Texturing, Pyramid, Half-sphere, RIE

1. 서론

단결정 실리콘 태양전지의 고효율을 위한 방법으로는 표면 조직화(texturing), 반사방지막(anti reflectance coating) 등을 이용하는 방법이 있다. 최근에는 입사광의 반사를 최소화시키는 조직화 연구와 후면 전극을 이용하여 표면에 입사 되는 광을 최대화시키려는 반사방지막 연구가 많이 진행 중이다[1]. 표면을 조직화하는 방법으로 습식식각, 건식식각 방법이 있는데, 습식식각의 경우 KOH, NaOH 용액이 사용된다. 최근에는 SDR된 표면에 균일한 도포과 전극 형성을 용이하게 하는 부드러운 피라미드 구조를 형성하기 위해 HND (HF : HNO : D.I. water) 용액을 사용하여 표면을 식각하

는 공정이 연구 중이다. 그 결과 접촉저항과 직렬저항이 낮아지는 결과를 제시하였다. 또한 소수 캐리어 수명을 향상 및 유지하기 위해 고온 소성 공정이 없는 Au 도금 공정으로 전면전극을 형성하는 공정이 진행 중에 있다[2]. 하지만 결정형 실리콘 태양전지 중 다결정 실리콘 태양전지의 불규칙적인 결정 방향으로 인해 표면 조직화에 많은 어려움이 있으며 또한 대면적화가 어렵고 고효율 및 원가 절감을 위해 웨이퍼의 두께가 점점 얇아져가는 초박화에 따른 공정으로 웨이퍼의 파손 손실이 증가하는 단점이 있다. 반면 건식식각은 습식식각과는 달리 환경적인 문제가 적고, 적은 양의 가스만으로 표면 조직화를 진행함으로써 공정비용의 절감, 대면적의 표면 조직화가 가능한 이점을 가지고 있다. 그래서 최근 단결정 실리콘 태양전지의 표면 조직화로 대면적 공정이 가능한 건식식각 방법 중 하나인 RIE (Reactive Ion Etching)에 관한 연구가 많이 진행 중이다[3, 4]. RIE는 반응성 기체나 이온으로 분해된 가스를 이용하여 물질을 선택적으로 제거하는 방법이며, 실리콘을 식각하기 위한 가스로 SF₆/O₂ 가스를 혼합하여 단결정 실리콘 태양전지 기판의 표면을 조직화하는 공정이다. RIE를 이용한 표면 구조는 가스나 RIE 파라미터에 따라 단결정 실리콘 기판위에 요철, 반구형, 바늘, 피라미드, 역 피라미드, 트렌치 구조로 형성된다[5, 6]. 단 건식식각을 이용한 역 피라미드 구조는 표면 조직화 형태 중 가장 좋은 광 흡수율을 보여주지만 Photo 공정 및 Mask-assisted 공정이 추가됨으로써 공정이 복잡해지는 단점이 있다. 이런 이유로 표면 조직화 된 구조 중 피라미드 구조가 많이 연구 되어 왔다. 피라미드 구조는 단결정 실리콘 태양전지 표면에 피라미드의 크기 및 피라미드의 표면 각도에 따라 광의 산란을 증가시켜준다.

¹경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

702-701, Sangyeok 3-dong, Buk-gu, Daegu, Korea

²대구가톨릭대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Catholic University of Daegu)

712-702, 13-13 Hayangro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, Korea

³경북대학교 산업전자전기공학부(School of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

742-711, Sangju Campus, Gajang-dong, Sangju-si, Gyeongbuk, Korea

*Corresponding author : choecs@knu.ac.kr

(Received : Aug. 14, 2013, Revised : Oct. 14, 2013, Accepted : Oct. 15, 2013)

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.

본 연구는 RIE를 이용한 피라미드와 반구형의 단결정 실리콘 태양 전지의 효율에 미치는 영향을 확인하기 위하여 단결정 실리콘 태양전지 기판 표면을 RIE를 이용하여 SF₆/O₂ 가스만을 혼합하여 표면 조직화 하였다. 피라미드 구조를 형성하기 위하여 RIE 내부에 metal-mesh를 장착하여 추가적인 공정을 진행하지 않고 플라즈마 내부에서 이온의 산란을 이용하여 단결정 실리콘 태양전지 기판 표면을 식각함으로써 단일공정인 RIE만을 사용하여 단결정 실리콘 태양전지 기판 위에 약 1 μm의 크기를 갖는 불규칙적인 피라미드 구조를 형성하였다. 피라미드와 반구형의 구조적인 차이를 확인하기 위하여 표면 구조에 따라 입사광의 반사 율수가 중요하게 되고 피라미드 구조의 경우 피라미드의 사이각에 따라 반구형 구조의 경우 반지름과 높이 비율에 따라 표면에서의 입사광의 반사 율수가 달라진다. 실제 피라미드와 반구형의 시료를 SEM (Scanning Electron Microscope)과 반사율을 이용하여 구조적인 차이를 확인하고 단결정 실리콘 태양전지 셀(cell)로 제작하여, 태양전지 효율을 측정하였다.

2. 연구 방법

2.1 RIE 파라미터 변경 실험

피라미드 구조를 단결정 실리콘 기판 위에 형성하기 위하여 RIE 챔버 내부에 metal-mesh를 장착하여 쉐도우(shadow) 마스크 역할로 사용하였다[6]. Fig. 1 RIE챔버 내부에 metal-mesh를 장착한 그림이다. Metal-mesh는 쉐도우 마스크 역할로 mesh의 구멍 크기는 150 μm, 구멍과 구멍의 간격은 10 μm, metal-mesh와 시료와의 간격은 7 mm이다. RIE챔버 내부에서 metal-mesh는 이온을 수직 방향으로 단결정 실리콘 기판과 충돌하는 것을 구멍을 통해 이온의 산란이 일어나게 되고 이온의 산란에 의해 기판 표면은 피라미드 구조로 형성된다. 또한 metal-mesh를 장착하여 파라미터를 변경함으로써 피라미드의 크기가 500 nm 이상의 크기와 피라미드의 α 값이 54° 이상인 불규칙적인 피라미드를 단결정 실리콘 기판 위에 형성하였다.

앞에서 언급한 것과 같이 RIE 챔버 내부에서는 파라미터들이 복합적으로 반응하기 때문에 피라미드와 반구형 구조를 형성할 수 있는 조건에서 각각의 파라미터들을 조절함으로써 피라미드와 반구형 구조를 단결정 실리콘 기판 위에 형성하였다. Fig. 2는 피라미드와 반구형 구조를 형성하기 위한 RIE 실험 조건이다.

피라미드 구조의 RIE 조건은 RIE챔버 내부에 metal-mesh를 장착하고 가스는 SF₆:O₂ = 1 : 1 비율로 RF 전압 200 W, 압력 200 mTorr, 공정 온도 5℃, 공정 시간은 15분 진행 하였을 때 피라미드 구조를 얻을 수 있었다. 반구형 구조의 경우 SF₆:O₂ = 2 : 3 비율로 RF 전압 300 W, 압력 100 mTorr, 공정 온도, 10℃, 공정 시간은 15분 진행 하였을 때 반구형 구조를 얻을 수 있었다. 피라미드와 반

구형 구조를 형성하는 위 두 조건에서 각각의 파라미터를 변경하여 적용함으로써 피라미드와 반구형 구조의 높이가 동일한 기판과 반사율이 비슷한 기판을 제작하였다.

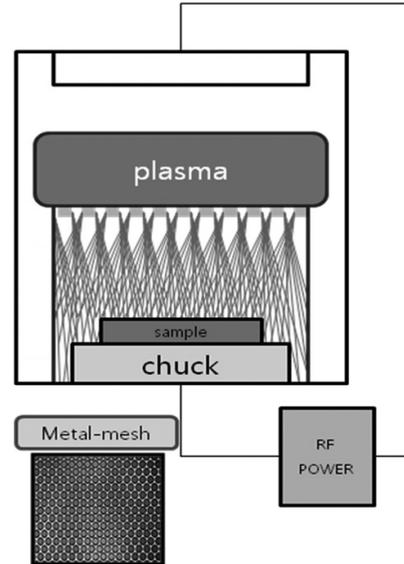


Fig. 1. Used metal-mesh of RIE systems.

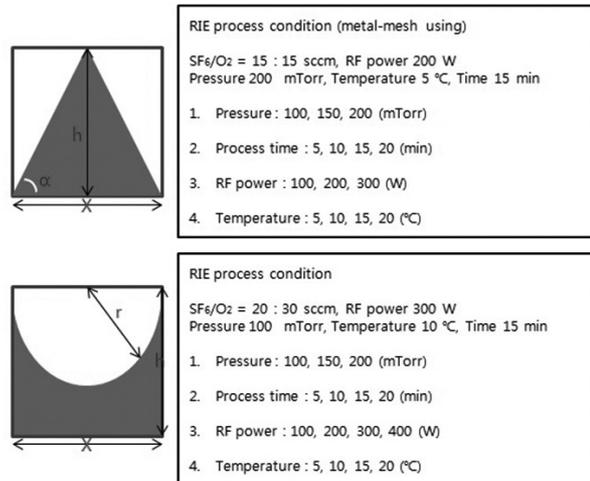


Fig. 2. RIE experiment condition for pyramid and half sphere structures.

2.2 단결정 실리콘 태양전지 셀(cell) 제작

2.2.1 단결정 실리콘 태양전지의 공정 순서도

Fig. 3은 단결정 실리콘 태양전지의 공정 순서도를 나타낸 것이다. 피라미드와 반구형 구조의 기판을 이용하여 단결정 실리콘 태양전지 공정을 적용하여 셀을 제작하였고 표면조직화 방법으로 RIE 챔버 내부에 metal-mesh를 사용하여 표면조직화

공정을 진행함으로써 단결정 실리콘 기판 위에 불규칙적인 피라미드 구조를 형성하였다. 반구형 구조의 경우 RIE 파라미터만을 사용하여 표면조직화 공정을 진행하였다. 이후 다른 공정은 동일한 단결정 실리콘 태양전지 제작 공정을 적용하여 진행하였다.

반사방지막은 표면 버스바(bus bar)를 제외한 부분에 Si_3N_4 를 750 Å 증착하였다. 표면과 후면전극을 완전히 분리하기 위해 다이싱(dicing) 장비를 이용하여 2x2 cm² 셀로 제작하여 태양전지 효율 측정을 진행하였다.

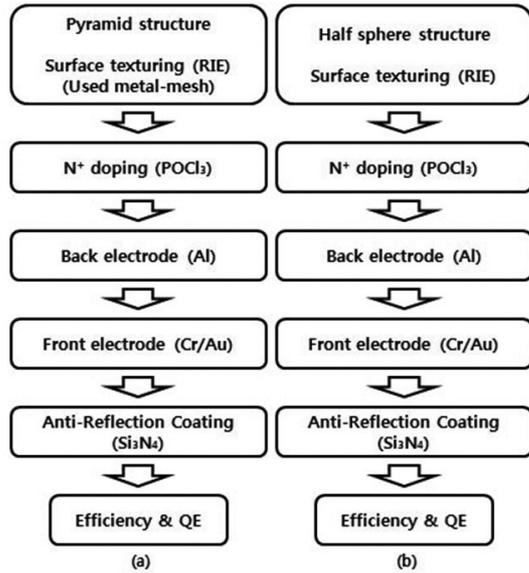


Fig. 3. Process flow chart of single crystalline silicon solar cell; (a) Pyramid structure and (b) half sphere structure.

2.2.2 태양전지 제작 공정

Fig. 4은 태양전지 제작 공정을 수직으로 나타낸 구조도이다. 태양전지 제작공정은 결정형 실리콘 웨이퍼 위에 붕소(boron)가 도핑된 p형 웨이퍼 (100)를 사용하였다. 뒷면에 RIE로 표면조직화 공정 후 POCl_3 가스를 이용하여 n+층을 형성하여 pn접합을 형성하였다.

후면전극은 thermal evaporation 장비를 이용하여 알루미늄(Al)을 5000 Å 증착하였다. 표면전극은 크롬/금(Cr/Au)을 100 Å, 2000 Å thermal evaporation 장비를 이용하여 증착하였다. 그리고

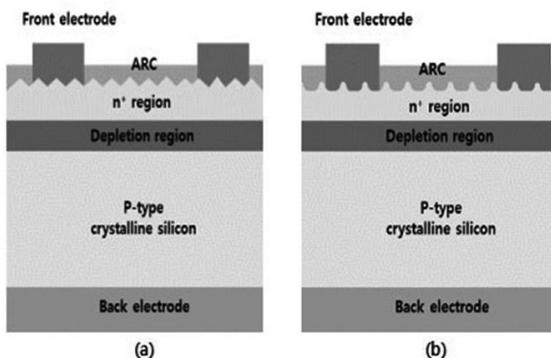


Fig. 4. Vertical process of single crystalline silicon solar cell; (a) Pyramid structure and (b) Half sphere structure.

3. 결과 및 고찰

3.1 RIE 파라미터 변경 실험 결과

RIE실험은 피라미드와 반구형 구조를 비교할 수 있는 기판을 형성하기 위하여 RIE파라미터를 각각의 조건을 바꾸어 실험하였고 SEM를 이용하여 표면 측정하였다. Fig. 6는 RIE내부의 공정시간에 따른 피라미드와 반구형 구조의 높이와 폭의 변화를 측정한 결과이다. 피라미드의 경우 공정시간이 15분 이상 진행 한 기판에서의 높이가 약 700~1000 nm의 높이를 갖는 불규칙적인 피라미드가 형성되었다. 피라미드의 폭의 경우 15분 이상 진행한 기판에서 700 nm의 크기 폭을 보였다.

반구형 구조의 경우는 공정시간이 증가함에 따라 15분 이상 진행한 기판에서 높이가 감소하는 것을 확인하였다. 폭의 경우 시간이 증가할수록 점차적으로 증가하는데 이것은 반구형 구조에서 높이 h와 반원의 반지름 r을 비교했을 때 반지름이 커져 반구형 구조가 타원형 형태로 변화되는 것을 의미한다. RIE파라미터 중 공정시간은 피라미드의 크기나 반구형 높이를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 그리고 공정 시간은 시간에 따라 기판의 형태 및 모양에 영향을 끼치기 때문에 피라미드와 반구형의 크기를 비교하기 위한 시료를 제거하기 위해 공정시간은 15분 이하로 진행 하였다.

Fig. 5은 RIE 내부의 압력 변화에 따른 피라미드와 반구형 구조의 기판의 폭과 높이를 측정한 그래프이다. 피라미드의 경우 압력이 100~200 mTorr로 점차 증가함에 따라 크기는 400~900 nm의 크기가 커지는 것을 보였다. 반구형의 경우 압력이 높아짐에 높이와 폭이 감소하였다. 또한 압력이 150 mTorr 이상의 조건에서는 반구형 구조의 경우 높이는 500 nm이며 폭이 5 μm을 갖는 반구형이 형성되었지만 압력이 증가될수록 반구형 구조는 형성되지 않았다. 앞에서 언급한 것과 같이 압력은 공정 시간과 같이 RIE 파라미터들 중 매우 중요한 파라미터이다.

압력은 RIE챔버 내에서 플라즈마와 기판 그리고 충돌하는 이온의 에너지에 영향을 미칠 수 있으며 전자의 에너지, 기판에 입사되는 이온과 라디칼의 상대 입사량, 표면 흡착에 의한 기판 표면의 커버리지 정도 등의 플라즈마 식각의 결과에 다양한 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 6은 RIE 실험을 통해 형성된 기판을 SEM을 이용하여 측정 한 사진이다. 크기를 비교하기 위한 실험으로 피라미드 조건은 가스 $\text{SF}_6:\text{O}_2 = 1 : 1$ 비율로, RF파워 200 W, 압력 200 mTorr, 공정 온

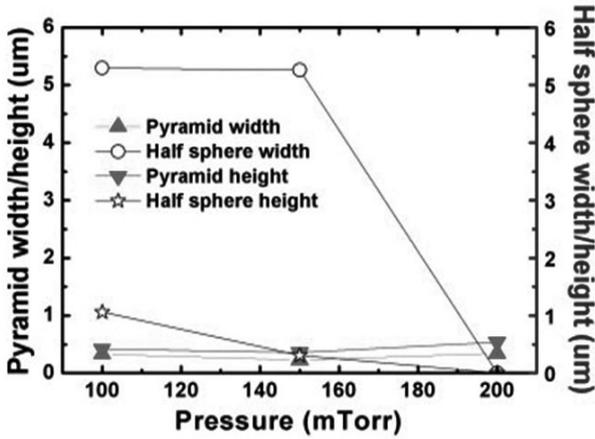


Fig. 5. Changed pressure of pyramid and half sphere structure.

도 10℃, 공정 시간은 15분 진행한 기판이다.

SEM 측정 결과는 피라미드 높이가 약 900~1000 nm 크기를 갖는 불규칙적인 피라미드가 형성되었다. 피라미드와 피라미드 사이 각은 76.1~80° 측정 되었으며 피라미드의 α값의 경우 약 50~60° 크기를 갖는 불규칙적인 피라미드가 균일하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있었다.

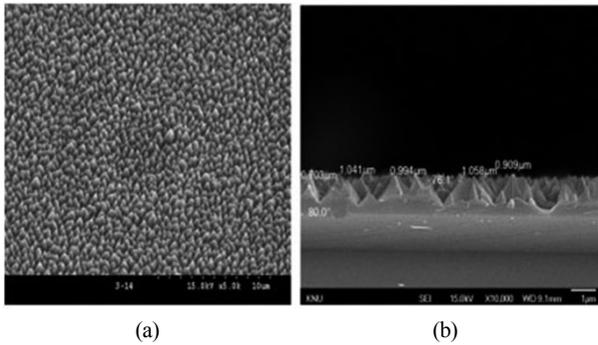


Fig. 6. SEM with the surface of pyramid structure; (a) Pyramid structure 45° and (b) pyramid structure 90°

Fig. 7은 반구형 구조를 형성 후 표면 측정을 한 SEM 사진이다. 반구형 구조의 조건은 SF₆:O₂ = 2 : 3 비율로 RF 300 W, 압력 100 mTorr, 온도 15℃, 공정 시간은 15분 진행 하였다.

반구형 구조의 경우 높이는 약 1μm 크기의 불규칙적인 반구형 구조로 표면에 형성되었다. SEM 측정 중 원을 그리기 위해 피라미드 구조와 배율을 다르게 측정하였다. SEM 45° 면에서 측정된 반구형 구조는 불규칙적인 반구형이 조밀하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 반구형 형태로 높이는 0.9 μm이면 반구형의 반지름은 2.1 μm 로 측정되었다.

RIE를 이용한 피라미드와 반구형 구조를 형성하여 동일한 면적에서 피라미드와 반구형 구조를 비교해 보았다. Fig. 8은 동일한 크기를 갖는 피라미드와 반구형 구조 기판의 표면을 측정 SEM 사진

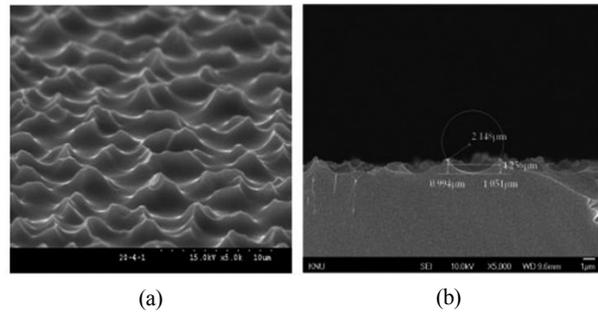


Fig. 7. SEM with the surface of half sphere structure; (a) Half sphere structure 45° and (b) half sphere structure 90°.

이다. 피라미드와 반구형 구조로 제작한 기판의 표면을 비교하기 위해 5 x 5 μm² 동일 면적에 동일한 배율에서 비교해 보았다. 동일한 크기를 비교하는 시료의 경우 약 38개로 5 x 5 μm² 면적 안에서 불규칙적인 피라미드가 분포되어있다. 반구형은 반구형과 반구형 사이의 거리가 4.48 μm의 크기를 보였으며 5 x 5 μm² 면적 안에서 반구형의 분포는 1~2개 정도 분포되는 것으로 피라미드와 반구형 구조를 비교하는 경우 피라미드가 반구형에 비해 표면적이 넓은 것을 알 수 있었다.

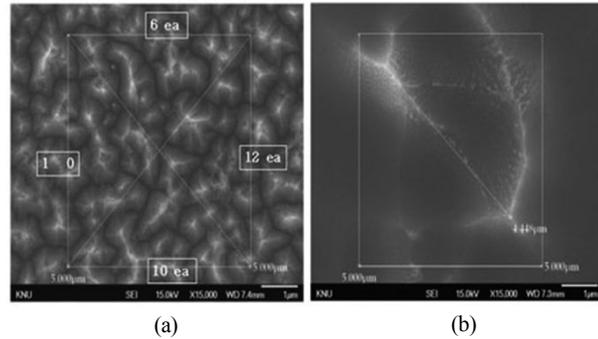


Fig. 8. Same size of pyramid and half sphere structures about surface SEM pictures; (a) Pyramid structure and (b) half sphere structure.

반사율이 비슷한 피라미드와 반구형 구조의 기판을 제작하였다. Fig. 9은 피라미드와 반구형 구조의 반사율이 비슷한 기판의 반사율 그래프이다. 시료의 광 특성을 보기 위해 UV/VIS/NIR (모델명 : Cary-5000)을 이용하여 반사율을 측정하였다. RIE실험을 통해 표면에 형성 된 피라미드와 반구형 구조의 시료들 중 반사율이 비슷한 시료를 비교한 것 이다.

그래프 상에서 형성된 피라미드와 반구형 구조의 반사율은 비슷한 수치를 보인다. 이 두 가지의 기판의 RIE조건은 피라미드의 경우, 가스 SF₆:O₂ = 1 : 1 비율로 RF파워 300 W, 압력 200 mTorr, 공정 온도 5℃, 공정 시간은 15분 진행한 기판과 반구형 구조 조건은 SF₆:O₂=2:3 비율로 RF 파워 100 W, 압력 100 mTorr, 온도 10

℃, 공정 시간은 15분 진행 하였을 때 기관이다. 실리콘의 흡수 파장 영역은 350~1200 nm로 경면 처리된 실리콘 단파장에서 60%의 반사율을 보이며 중간 파장에서 반사율이 40% 측정되었다. 피라미드 구조는 반구형 구조보다 단파장에서 3% 더 높은 수치를 보였다. 반사율을 측정 후 두 가지 RIE 조건을 적용하여 단결정 실리콘 기관 위에 피라미드와 반구형 구조를 형성하였다. 실험을 통해 측정된 결과를 적용하여 동일한 크기를 갖는 피라미드와 반구형 구조의 기관을 형성하였고 그리고 태양전지 공정을 적용하여 태양전지 셀로 제작하였다.

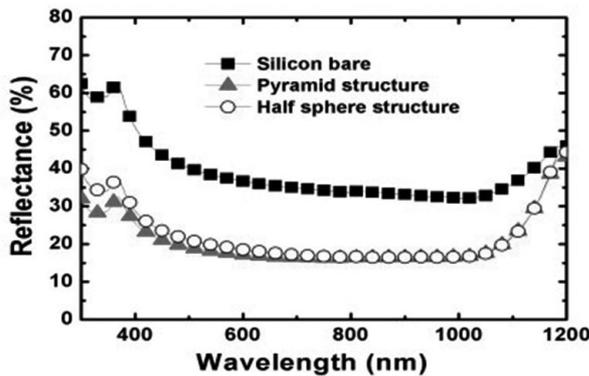


Fig. 9. The same reflectance of pyramid and half sphere structures.

3.2 태양전지의 특성 분석

태양전지의 효율 측정은 대구 나노융합실용화 센터의 태양전지 모듈실증 평가 장비(제작사: (주) 테크노스, 모델명: MP170)를 이용하였다. Bare 단결정 실리콘 태양전지 셀의 효율은 Voc 547 mV, I_{sc} 83.65 mA 측정 되었다. 단위 면적당 흐르는 전류 J_{sc} 경우 23.92 mA/cm² 수치를 보였다. 곡선인자(fill factor : FF)는 40% 수치를 보였다.

Bare태양전지 셀의 경우 효율은 5.25% 효율이 측정되었다. Table. 1는 크기가 동일한 피라미드와 반구형 구조의 단결정 실리콘 태양전지 셀을 제작하여 측정된 표이다. 피라미드 구조의 경우 효율은 12.51%, Voc 540 mV, I_{sc} 125.82 mA 측정 되었다. 단위 면적당 흐르는 전류 J_{sc} 경우 35.98 mA/cm² 수치를 보였다. 반구형 구조의 경우 효율은 11.42%, Voc 540 mV, I_{sc} 115.51 mA, J_{sc} 33.03 mA/cm² 수치를 보였다. 동일한 크기의 피라미드와 반구형 구조의 곡선인자 값은 64% 동일한 태양전지가 제작되었다. 이것은 피라미드 구조의 J_{sc}는 35.98 mA/cm², 반구형 구조는 33.03 mA/cm²로 피라미드 구조가 2.95 mA/cm² 더 높은 수치로 피라미드 구조가 반구형 구조보다 단위 면적당 2.95 mA 더 높은 광을 수집하는 것으로 측정되었다.

Table 1. Efficiency of single crystalline silicon solar cell

Items	Result (Pyramid)	Result (Halfsphere)	Unit
VOC	0.54	0.54	V
ISC	125.82	115.51	mA
JSC	35.98	33.03	mA/cm ²
Fill Factor	64.38	64.31	%
Imax	106.71	97.68	mA
Vmax	0.41	0.40	V
Pmax	43.76	39.92	mW
Efficiency	12.51	11.42	%

4. 결론

본 논문에서는 RIE를 이용하여 단결정 실리콘 기관 위에 피라미드와 반구형 구조를 형성하여 단결정 실리콘 태양전지의 효율에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 피라미드 구조의 경우 피라미드의 크기를 크게 형성하기 위해 RIE 내부에 Metal-mesh를 장착하였고 반구형 구조의 경우 RIE의 파라미터인 압력, 공정시간 RF 전압, 공정 온도의 파라미터 변경 실험을 통해 단결정 실리콘 기관 위에 동일한 크기를 갖는 피라미드와 반구형 구조의 시료와 광 특성을 비교하기 위해 비슷한 반사율을 갖는 피라미드와 반구형 구조의 시료를 제작하였다. 또한 각각의 시료들을 결정형 실리콘 태양전지의 단일공정을 적용하여 2x2 cm² 셀로 제작하여 구조적인 차이와 전기적인 특성을 비교하였다. 구조를 비교하기 위한 피라미드 구조의 셀 효율은 12.51%, 반구형 구조는 11.42%의 효율로 피라미드 구조가 1.09% 더 높은 효율로 측정되었다. 변환효율은 피라미드와 반구형 구조가 64.3% 동일하게 측정되었고 이것은 피라미드와 반구형 구조의 효율 차이는 R_s 값을 제외한 I_{sc} 10.3 mA, J_{sc} 2.9 mA/cm², 수치로 피라미드 구조가 반구형 구조보다 표면에서 더 많은 전자를 수집하는 것으로 확인하였다. 피라미드 구조의 경우 광을 흡수하는 면에서는 피라미드 구조가 반구형 구조에 비해 뛰어나지만 RIE를 이용하여 표면조직화 공정을 진행한 기관의 경우 불규칙적인 피라미드 구조로 결정형 실리콘 태양전지 제작을 위한 n⁺층 형성 공정이 최적화 되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 중소기업기술혁신사업(SA113540)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] J. S. Lee and G. H. Kim, "Solar cell engineering", pp. 22-28, 2007.
- [2] H. O. Jung, "Improvement of silicon solar cell efficiency according to pyramid structure and anti-reflection coating process condition", Master's Thesis, Kyungbook National University, Daegu, Korea, 2013.
- [3] Y. Inomate, K. Fukui, and K. Shirasawa, "Surface texturing of large area multi crystalline silicon solar cells using reactive ion etching method", *Solar Energy Materials and Solar Cell*, Vol. 48, pp. 237-242, 1997.
- [4] H. F. W. Dekkers, F. Duerinckx, J. Szlufcik, and J. NIJS, "Silicon surface texturing by reactive ion etching", *Opto-electronics review*, Vol. 8 pp. 311-316, 2000.
- [5] V. Y. Yerokhov, R. Hezel, M. Lipinski, R. Ciach, H. Nagel, A. Mylyanych, and P. Panek, "Cost-effective methods of texturing for silicon solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 72, pp. 291-298, 2002.
- [6] T. Juvonen, J. Harkonen, and P. Kuivalainen, "High efficiency single crystalline silicon solar cells", *Physica Scripta*, Vol. T101, pp.96-98, 2002.
- [7] B. O. Cho, J. H. Ryu, S. W. Hwang, G. R. Lee, and S. H. Moon, "Direct pattern etching for micromachining applications without the use of a resist mask", *J. Vac. Sci Technol. B*, Vol. 18, pp. 2769-2773, 2000.
- [8] G. Y. Yeum, "Plasma etching technique", pp. 249-264, 2006.
- [9] J. S. Yoo, I. O. Parm, U. Gangopadhyay, K. H. Kim, S. K. Dhungel, D. Mangalaraj, and J. S. Yi, "Black silicon layer formation for application in solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 90, pp. 3085-3093, 2006.