

플라즈마기반 표면 Texturing 공정에 따른 다결정 실리콘 웨이퍼 표면물성과 태양전지 동작특성 연구

박광목^a · 정지희^b · 배소익^b · 최시영^a · 이명복^{c*}

^a경북대학교, 대구 702-701

^b미리넷솔라(주), 대구 704-947

^c(재)대구테크노파크크나노융합실용화센터, 대구 704-801

(2011년 1월 5일 받음, 2011년 4월 27일 수정, 2011년 5월 2일 확정)

다결정 실리콘 태양전지 표면의 광흡수율을 극대화시키기 위하여 플라즈마기반의 reactive ion etching (RIE) 공정을 적용하였으며 maskless 표면 texturing조건을 최적화하여 310~1,100 nm 파장대역의 평균 표면반사율을 4±1% 내외로 감소시킬 수 있는 grass-like 한 블랙실리콘을 제조할 수 있었다. Saw damage를 가진 15.6×15.6 cm² bare 웨이퍼에서부터 중요 공정 단계별로 처리된 시료들의 평균반사율, 표면형상, 소수운반자 수명 등의 위치분포를 측정하여 최종 제작된 태양전지의 광전변환효율과 외부양자효율 등과 비교 검토하여 고효율 다결정 실리콘 태양전지 양산에 필요한 표면 texturing 조건들을 연구하였다. 평균 반사율을 4% 이하로 감소시키는 texturing 공정조건에서 웨이퍼 중앙에서 가장자리로 갈수록 표면구조의 깊이 2배 반치폭 3배의 불균일성이 발생하였으며 이에 따라 입사광자의 다중반사확률이 높아져 평균반사율이 1% 정도 낮아지는 것으로 밝혀졌다. 비반사막이 코팅된 시료에서 측정된 소수운반자수명분포도 중앙에서 가장자리로 갈수록 약 40% 이상 더 긴 수명을 갖는 것으로 밝혀져 표면구조의 크기에 따른 사이즈효과가 발생하는 것으로 판단된다. 제조된 태양전지의 위치에 따른 광전변환효율도 낮은 반사율과 더 긴 소수운반자수명을 갖는 가장자리에서 2% 가량 높은 광전변환효율을 보였으며, 380~1,100nm 파장대역의 외부양자효율 측정결과도 이를 뒷받침하고 있다. 균일한 에미터 층 형성 및 ARC 증착에 있어서 구조적으로 가장자리 부분의 구조가 유리한 것으로 예상되며, 동시에 표면 구조의 사이즈 효과 때문에 표면 재결합확률이 중앙보다 가장자리에서 더 감소되어 더 높은 광전변환효율을 보이는 것으로 해석된다.

주제어 : 다결정 실리콘 태양전지, Reactive ion etching, Texturing, 표면결합, 소수운반자수명

I. 서 론

녹색성장이 핵심 화두가 되고 있는 시대적 요구에 따라 청정에너지원으로 인식되고 있는 태양에너지에 기반한 다양한 에너지수확기법들이 연구개발되어 상용화되고 있으며 태양열과 태양광을 이용한 발전시스템은 대표적인 녹색산업으로 자리를 잡고 있다. 특별히 태양광에너지를 전기적인 에너지로 변환시키는 태양광산업은 화석에너지인 석유의 수급불안정에 기인한 가격급등과 더불어 범세계적인 탄소배출규제법의 시행에 대비한 각국 정부의 지원정책과 맞물려 그 시장규모가 폭발적으로 확대될 전망이다. 하지만 태양전지의 발전단가는 석유나 원자력 등에 비하여 월등히 높기 때문에 저가의 고효율 다결정 실리콘 태양전지를 개발하기 위한 다양한 연구개발이 수행되고 있다 [1]. 태양전지의

발전원리는 표면에 입사되는 광자들이 흡수되어 pn 접합 근처에서 전자-정공쌍을 생성하는 비율과 생성된 전자-정공쌍이 재결합되지 않고 각각 분리되어 전자는 음극전극으로 정공은 양극전극으로 포집되는 3단계의 과정을 거치는 것으로 알려져 있다 [2]. 고효율 태양전지개발을 위해서 앞에서 언급한 3단계 중 첫 단계에서 표면에 입사되는 300~1,200 nm 파장대역의 태양광을 최대한 흡수할 수 있는 표면구조나 비반사코팅(Anti-Reflection Coating; ARC)막을 활용하여 입사광 손실을 줄이는 것이 필요하며 이를 위해서 표면에 다중 반사를 유도하여 광흡수를 증가시키는 표면 texturing 기술에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 일부 상용화되고 있다 [2].

현재 다결정 실리콘 표면 texturing 기술은 단결정 실리콘 texturing 방식에 사용되던 습식식각 방식을 이용하여

* [전자우편] mblee@npac.or.kr

진행되고 있다. 등방성 식각 특성을 가지는 습식식각 방식은 한 가지 결정 방향을 가지는 단결정 실리콘에서 규칙적인 피라미드 구조를 형성하기 용이하지만 여러 결정방향의 grain을 가지는 다결정 실리콘에서는 표면에 규칙적인 구조를 형성하기 어려운 단점을 가진다 [3]. 따라서 효과적인 다결정 실리콘 표면 texturing을 위해서 기계적인 방식의 V-grooving, multi-wire sawing, 레이저를 이용한 grooving, 플라즈마 건식식각을 이용한 표면 texturing 등의 다양한 연구가 보고되고 있다 [4-9]. 그 중에서 빠른 공정시간과 표면구조 형성의 용이성 및 간단한 공정 등의 장점을 가지는 플라즈마 건식식각 중의 하나인 RIE 건식식각 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본 Kyocera 사에서는 Cl₂ 가스를 이용한 RIE texturing 공정으로 17.1%의 고효율 셀 제작을 보고하고 있다 [10]. 최근에는 Cl₂ 가스의 유독성 때문에 SF₆/O₂, SF₆/CHF₃/O₂ 또는 SF₆/O₂/Cl₂ 등의 혼합 가스를 이용한 표면 texturing 기술에 대한 연구가 보고되고 있다 [4,11,12]. 이들 혼합가스 중 SF₆/O₂ 혼합 가스는 식각용 패턴마스크 없이 실리콘 표면에 적절한 형상의 표면구조를 제작할 수 있는 것으로 알려지면서 많은 연구에 적용되고 있으며 선행연구에 따르면 SF₆/O₂ 혼합 가스는 특정한 플라즈마조건에서 실리콘 표면에 국부적인 휘발성 oxyfluoride 막을 형성하여 패턴공정 없이 적절한 needle 또는 grass-like 구조를 형성할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 SF₆/O₂ 혼합가스를 사용하는 RIE 기법을 적용하여 maskless 15.6×15.6 cm² 대면적 다결정 실리콘 웨이퍼 표면 texturing 공정에 따른 표면형상, 평균반사율 분포, 소수반사수명 분포 등의 변화와 제조된 태양전지의 특성변화를 연계하여 효율변화에 영향을 미치는 거시적인 핵심원인 등을 규명하고자 하였다. 태양전지용 다결정 실리콘 웨이퍼에 대한 Maskless RIE texturing 공정변수를 제어하면서 최저 평균반사율을 모니터링하였으며, 표면 texturing된 다결정 실리콘 태양전지를 제작하여 광전변환 효율, 외부양자효율 등을 측정하고 동시에 series 저항과 shunt 저항 등을 도출하여 반사율과 광전변환효율의 상관관계에 대해서 고찰하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 사용한 장비는 Inductively Coupled Plasma

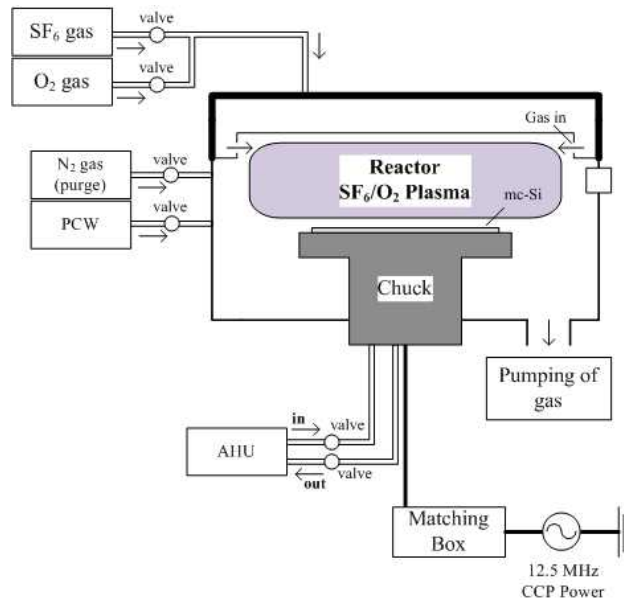


Figure 1. Schematic diagram of the ICP-RIE system.

(ICP)-RIE 시스템이며 개략적인 모식도는 Fig. 1과 같다. RIE texturing 공정조건 최적화와 로드락 시스템을 통한 시료의 반입과 반출을 위해 상·하부 전극간격은 75~160 mm까지 조절이 가능하고, Mass-flow controller (MFC)를 프로그램으로 제어함으로 가스 주입 양 및 혼합비율 등을 세밀하게 조절할 수 있도록 제작되었다. 플라즈마 발생 챔버 내의 동작압력은 가스 pumping line의 중앙에 위치하는 throttle valve에 의해서 조절이 가능하다. 플라즈마는 CCP 타입을 이용하여, 12.50 MHz 주파수의 마이크로웨이브에 의해서 생성되며, 파워는 최고 600 W까지 조절이 가능하다. 다결정 실리콘 표면에 대한 RIE texturing 공정은 RIE power, 총 가스 유량, 가스비율, 식각시간, 동작압력, 상·하부 전극간의 간격 등의 RIE 공정 변수를 조합하여 수행하였으며 310~1,100 nm 파장대역에 대한 반사율의 평균이 최저가 되는 공정조건 확보를 목표로 하였다. RIE texturing 공정에 사용된 다결정 실리콘 웨이퍼는 비저항 1.4~1.6 Ω·cm, lifetime 1.5 μs 이상이며, 두께 약 200 μm, 정사각형의 15.6×15.6 cm²인 boron이 도핑된 p-type solar grade (SOG) 다결정 실리콘 웨이퍼이다. 공정 진행시 각각의 실험 조건별 신뢰성을 향상시키기 위해서 같은 잉곳에서 제작되어 같은 grain 그룹을 가지는 이웃한 웨이퍼를 가지고 공정을 진행하였다. 표면 texturing이 완료된 다결정 실리콘은 RADITECH사의 D/8 intergration sphere spectroscopic reflectometer 장비를 이용하여 AM 1.5 기준

광원에 대한 위치에 따른 반사율을 측정하였으며, 15.6×15.6 cm² 대면적 전면적에 대한 소수반사율은 SEMLAB 사의 WT-2000PV 장비를 이용하여 측정하였으며, 반사율과 소수반사율과의 상관관계를 규명하고 간접적으로 표면결함밀도에 대한 상대적인 영향을 분석하였다. 또한 FE-SEM으로 위치에 따른 표면형상과 구조를 관찰하여, texturing 형상과 반사율의 관계 및 표면구조가 태양전지 제조공정과 동작특성 등에 미치는 영향을 분석하였다.

태양전지 제작 과정은 Texturing 공정 후 n-형 불순물 확산공정에 의해서 에미터 층을 형성하고 phosphorous silica glass (PSG)를 제거한 다음, 태양광이 입사되는 공기층과 실리콘 표면 사이의 굴절률 차이를 감소시키기 위해 표면에 SiN_x막을 증착하여 표면반사율을 감소시키고 동시에 전하운반자의 재결합 센터로 작용하는 표면 결함에 대한 passivation을 진행하였다. 후면전극과 전면전극을 screen printing 법으로 형성하고 소성공정을 통해서 전극을 완성하였다. 완성된 태양전지의 가장자리는 단락의 요인이 될 수 있어 레이저 절단에 의한 edge isolation을 수행하여 p-n접합을 확보함으로써 표면에 texture 구조를 가진 태양전지 제작을 완료하였다. 제작된 태양전지는 I-V 특성으로부터 광전변환효율과 태양전지의 소자변수에 대한 분석과 동시에 외부양자효율을 측정하였으며, 위치에 따른 분석은 샘플을 위치별로 3×9 cm² 크기로 레이저 절단 후 효율 및 EQE 측정을 실시하였다.

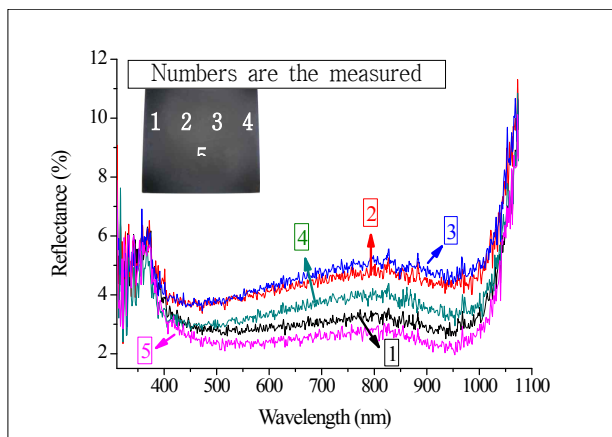


Figure 2. Optical reflectance curves for 5 measurement positions after surface texturing.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 최적화된 RIE 공정조건에서 처리된 다결정 실리콘 웨이퍼에 대해 310~1,100 nm 파장에서 동일 웨이퍼 내 특정 위치(내부 삽입그림)에 따른 반사율 측정결과를 나타낸 것이며 위치에 따라 평균반사율이 3~5% 범위내의 불균일성이 존재하는 것으로 나타났다. 반사율 측정은 15.6×15.6 cm² 대면적 다결정실리콘의 중앙 부분을 기준으로 한 쪽 가장자리에서 반대쪽 가장자리 방향으로 5곳에서 측정되었으며 위치에 따른 평균반사율을 비교해 보면 3.49, 4.65, 4.82, 3.81, 3.05% 순으로 중앙 부분의 반사율이 가장 높고 가장자리로 갈수록 반사율이 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 불균일성은 대면적 표면처리 공정조건에서 챔버 내 가스유량, 공정압력, 플라즈마 파워 등의 변수에 의해 생성된 플라즈마 이온밀도의 불균일성과 동시에 웨이퍼 표면에 존재하는 다양한 결정방향 등에 기인하여 발생할 수 있는 식각율의 차이에 의한 것으로 이해할 수 있다. 본 시료에 대한 전체 평균 반사율은 3.96%로 블랙실리콘 표면을 나타내었으며 위치에 따라 대략 ±1% 내외의 평균반사율 차이가 존재하는 것으로 확인되었다.

동일 웨이퍼 내에서 위치에 따른 평균반사율 차이가 발

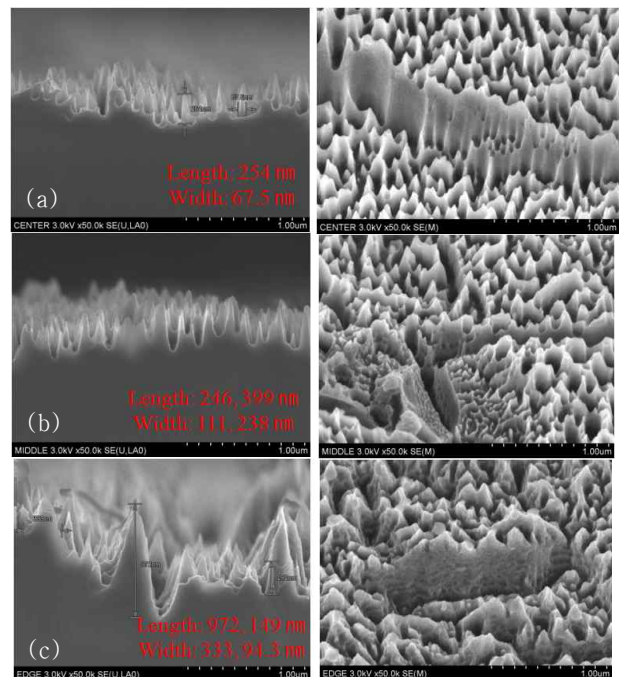


Figure 3. Surface morphology for 3 measurement positions. (a) Center. (b) Left middle. (c) Left edge.

생하는 texturing 표면형상 및 구조와의 상관관계를 규명하기 위하여 FE-SEM을 통한 미세표면 형상을 관찰하였으며 Fig. 3은 반사율이 측정된 부분의 단면 이미지와 30° 기울인 이미지를 보여주고 있다. (a)는 중앙(center) 부분의 이미지를 보여주고 있으며, (b)는 중앙과 왼쪽 가장자리의 중간(left middle) 부분, (c)는 왼쪽 가장자리 (left edge) 부분의 이미지를 보여주고 있다. 마스크 없이 처리되는 RIE 공정조건에서 전반적인 표면 형태는 grass-like 구조를 나타내었으며, 위치별 각각의 구조에 대한 분석결과 중앙 부분의 깊이는 평균 약 274 nm, 반치폭 67.5 nm였으며, 중앙과 왼쪽 가장자리 중간 부분의 깊이는 평균 약 322.5 nm, 반치폭 174.5 nm였고 왼쪽 가장자리의 깊이는 560.5 nm, 반치폭 213.7 nm로 가장자리로 갈수록 grass-like 구조의 깊이와 폭이 증가하는 경향을 나타내어 평균 반사율의 위치별 변화원인은 texturing 구조 내 입사광의 다중반사 확률의 증가에 기인한 것으로 이해된다. 표면 구조의 깊이와 반치폭은 가장자리로 갈수록 증가하지만 모든 위치에서 관찰된 식각면의 기울기는 약 70~80°를 유지하는 동일한 형상을 갖는 것으로 관찰되어 전체적으로 식각면의 기울기는 유사하며 식각 깊이만 달라지는 것으로 확인할 수 있었다. 따라서 웨이퍼 중앙부분의 표면형상은 뾰족한 needle-like 구조에 가깝고, 가장자리로 갈수록 뾰족한 끝을 가지면서 피라미드 형태를 유지하는 grass-like 구조가 관찰되었고, 결과적으로 반사율이 가장 높은 중앙부분의 texture 구조는 needle 구조로 인하여 상대적인 texture 밀도가 높았으며 30° 기울인 이미지에서도 이런 결과를 잘 보여주고 있다. 최소 반사율을 갖는 구조를 얻기 위해서는 입사된 광이 texture 구조들 사이를 잘 침투할 수 있는 적절한 간격과 다중 반사가 일어날 수 있는 적절한 깊

이의 구조가 필요함을 알 수 있었다.

지금까지의 선행연구에서 건식 texturing 공정 후 광 흡수율이 개선된 경우에도 제작된 태양전지들에서 광전변환 효율은 오히려 감소하는 것이 잘 알려져 있으며 [4], 그 원인의 규명은 중요한 연구이슈가 되고 있다 [4,13,14]. 본 연구에서는 반사율의 차이를 나타내는 각 위치에 대한 전하운반자들의 특성을 살펴보기 위하여 동일한 시료에 대해 소수운반자수명의 위치별 분포를 측정하여 평균치를 도출하고 위치별 평균반사율과의 상관관계를 검토하고자 하였다. Fig. 4는 3종의 시료 a) bare mc-Si 웨이퍼, b) RIE textured mc-Si 웨이퍼, c) ARC막이 증착된 RIE textured mc-Si 웨이퍼에서 측정된 소수운반자수명의 분포도를 비교하여 나타낸 것이다. Bare mc-Si의 경우 unpolished 웨이퍼이므로 saw damage 로 인한 표면 결함의 영향으로 평균 소수운반자수명이 약 0.81 μ s로 짧은 것으로 측정되었으며, RIE 공정 후에는 표면 식각에 의한 saw damage의 영향은 일부 감소하지만 플라즈마 damage로 인한 추가 표면 결함발생 등의 영향으로 0.95 μ s의 유사한 평균수명을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 에미터 층 형성 후 ARC막을 증착한 다음 측정된 평균 소수운반자수명은 ARC의 passivation 역할 때문에 2.15 μ s로 증가하였다. 이 때 위치별 ARC 두께는 왼쪽 가장자리가 91.4 nm, 굴절률이 2.02, 중앙부분 두께가 62.6~70 nm, 굴절률이 2.28~2.56, 오른쪽 가장자리 두께가 91.7 nm, 굴절률이 1.91로 측정되었다. 표면 texturing구조의 차이가 ARC 증착시 막성장예 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 소수운반자 수명분포도를 보면, RIE 공정 후에는 중앙부분과 가장자리의 소수운반자수명은 왼쪽 가장자리를 제외하고 급격하게 큰 변화가 발생하지 않는 반면, 에미터 층 형성 후 ARC를 증착한 후의 결과는 중앙

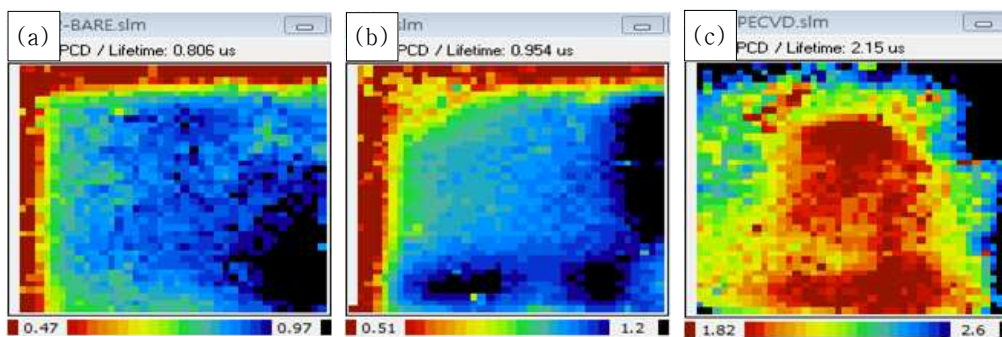


Figure 4. Distribution of minority carrier life time for 156 ×156 mm² mc-Si wafer. (a) Bare mc-Si. (b) After RIE texturing. (c) After depositing ARC on emitter layer.

부분에서 1.82 μs 의 수명을 가지나 가장자리에서는 약 2.6 μs 의 보다 더 높은 수명을 보이고 있다. 소수운반자의 수명에 영향을 미치는 요소로서 웨이퍼 내 grain boundary와 격자결함 그리고 표면결함으로 인한 재결합중심 밀도를 고려할 수 있으나 동일 웨이퍼 내에서 변화의 핵심요소는 표면결함밀도의 차이라 할 수 있다. 초기 웨이퍼와 RIE texturing 웨이퍼의 소수운반자수명에 큰 차이가 발생하지 않는 것은 초기 웨이퍼의 경우 saw damage의 영향 때문이며, texturing 후의 경우 RIE 공정으로 일부 saw damage가 제거되긴 하지만 RIE 공정상의 plasma damage가 발생하기 때문에 소수운반자수명이 여전히 낮은 것으로 예상된다. 에미터 형성 후 ARC 증착된 샘플의 경우 소수운반자수명은 에미터 형성 시 고온 공정에 의한 기판 품질개선과 PSG 제거공정을 거치면서 일부 표면결함이 제거되고, ARC를 통해서 표면결함의 일정량이 passivation 되면서 평균수명은 2 배 이상 향상되는 것으로 설명할 수 있다. 특별히 ARC막이 도포된 후 소수운반자수명은 동일 웨이퍼 내에서 가장자리가 중앙부분보다 상대적으로 긴수명을 보이는데 이것은 중앙과 가장자리의 표면 texturing 구조의 차이에 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 구조적인 관점에서 보면, 반치폭의 증가에 따른 표면산란횟수의 감소에 대응하는 사이즈 효과도 일부 존재할 것으로 유추된다. 결국 고효율 결정질 실리콘 태양전지개발을 위해서는 충분히 긴 소수운반자수명의 확보가 필수적이므로 표면의 saw damage에 기인한 표면결함밀도를 효율적으로 제거할 수 있는 적절한 saw damage remove (SDR) 공정이 필요하며 이어지는 texturing 공정에서 공정조건의 적절한 제어를 통해 충분히 넓은 반치폭과 동시에 낮은 반사율을 나타낼 수 있도록 표면형상구조가 최적화되어야 한다.

RIE texture 된 다결정 실리콘 웨이퍼를 기반으로 제작된 태양전지에서 측정된 특성치를 Table 1에 적시하였다.

Table 1. Performance of mc-Si solar cell with RIE textured surface.

Position of cell	Cell area (mm^2)	Efficiency [%]	V_{oc} [V]	J_{sc} [mA/cm^2]	FF [%]	R_{series} [$\text{m}\Omega$]	R_{shunt} [Ω]
Total	156×156	10.1	0.50	29.6	67.6	7	10
Left	30×90	10.6	0.50	31.6	67.5	80	101
Left middle	30×90	8.8	0.46	29.2	65.0	60	88
Center	30×90	8.1	0.45	28.2	64.5	36	66
Right middle	30×90	9.1	0.47	29.4	65.9	49	76
Right	30×90	10.7	0.52	30.6	67.9	90	113

셀 전체 광전변환효율은 10.1%였으며 fill factor (FF)값은 67.6%이고 개방전압은 0.5V 그리고 단락상태 전류밀도는 $29.6\text{mA}/\text{cm}^2$ 였다. 위치에 따른 평균반사율과 소수운반자수명 등과의 비교를 위하여 제작된 태양전지를 중앙부분을 기준으로 왼쪽가장자리부터 오른쪽 가장자리까지 $3\times 9\text{ cm}^2$ 크기로 각각 자른 다음 5개 샘플을 위치별로 측정하였다. 측정된 특성치는 왼쪽 가장자리부터 오른쪽 가장자리까지 10.6, 8.8, 8.1, 9.1, 10.7%의 광전변환효율을 나타내어 일반적으로 예상할 수 있는 바와 같이 반사율이 낮고 소수운반자수명이 길수록 상대적으로 높은 효율을 나타내었다. 위치에 따른 반사율과 소수운반자수명 및 효율과의 상관관계는 Fig. 5에 나타내었다. 평균반사율이 4% 이하로 낮음에도 불구하고 제작된 태양전지의 동작특성은 습식기법으로 texture된 태양전지에서 도출되는 16%대의 변환효율, 78%대의 FF값과 0.6 V 이상의 개방전압, $34\text{ mA}/\text{cm}^2$ 이상의 단락전류밀도 등과 비교하면 매우 열악한 특성을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다. 지나치게 뾰족한 표면구조에 기

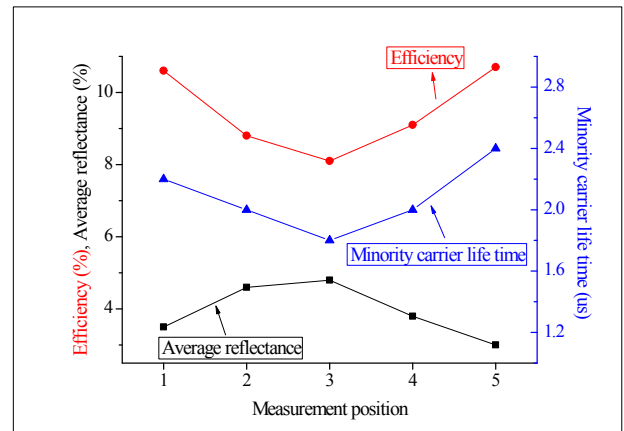


Figure 5. Comparison of position-dependent efficiency versus minority carrier life time and average reflectance.

인하는 공정상의 영향을 확인하기 위하여 태양전지 해석모델에 기반하여 참고문헌 [15]에 제시된 방법으로 shunt 저항과 series 저항도 분석하였다. Shunt 저항과 series 저항은 각각 $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ 태양전지에서는 $10 \text{ }\Omega$ 과 $7 \times 10^{-3} \text{ }\Omega$ 이었고 $3 \times 9 \text{ cm}^2$ 위치별 조각 태양전지에서는 중앙에서 $66 \text{ }\Omega$ 과 $36 \times 10^{-3} \text{ }\Omega$, 가장자리에서는 대략 $100 \sim 110 \text{ }\Omega$ 과 $80 \sim 90 \times 10^{-3} \text{ }\Omega$ 을 갖는 것으로 분석되었다. 태양전지에서 series 저항은 태양전지의 개방전압과 FF값에 연동된 광전 변환효율에 영향을 미치기 때문에 16%대의 변환효율을 갖는 상용 다결정 실리콘 태양전지에서 도출되는 $1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ }\Omega$ 과 비교하면 10~30배 정도 더 높은 것으로 밝혀져 오염성 접촉이 매우 불량한 것으로 해석할 수 있다. 더불어 shunt 저항은 폐회로 전류밀도의 크기에 영향을 미침으로 실제 태양전지의 출력과 더불어 장기 안정성 등에 영향을 미치는 중요한 인자로서 상용 태양전지의 $100 \text{ }\Omega$ 대와 비교할 때 유사하거나 약간 낮은 정도로 밝혀져 pn접합은 양호한 것으로 밝혀졌다. 특히 중앙에 비해서 가장자리로 갈수록 2% 이상 효율이 증가되는 원인은 95%에서 97%로 개선된 광흡수율과 $1.8 \text{ }\mu\text{s}$ 에서 $2.6 \text{ }\mu\text{s}$ 로 길어진 소수운반자수명이 효율을 개선하는 원인으로 작용하지만 $36 \text{ m}\Omega$ 에서 $90 \text{ m}\Omega$ 으로 증가된 series 저항은 전체적인 효율을 저하시키는 원인으로 판단된다. 태양전지의 소자특성을 나타내는 FF값은 중앙이 64.5% 가장자리가 68%로 미세하지만 개선되는 원인은 series 저항의 증가에 따른 부정적인 영향보다 shunt 저항의 개선에 의한 긍정적인 영향이 더 크게 작용하는 것으로 이해된다. 특별히 shunt 저항의 감소는 자생전기장의 강도와 분포를 왜곡시켜 전자-정공쌍의 분리 이동속도 등에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 외부양자효율에 직접적인 감소 원인으로 해석될 수 있다.

평균 약 95% 이상의 높은 광 흡수율에도 불구하고, 16%대의 효율을 나타내는 상용 다결정 실리콘 태양전지와 비교했을 때, 약 6% 정도 저하된 효율을 나타내는 원인은 소수운반자수명 측정결과에서 밝혀졌듯이 비록 ARC 증착으로 일부 표면결함의 passivation이 가능하지만 표면구조의 최적화가 이루어지지 않은 경우에는 전하운반자의 행로에 표면과의 산란횟수가 증가됨에 따라 재결합률이 급격하게 높아져서 단락전류밀도가 12~15% 이상 감소하는 중요한 원인으로 판단되며 그 외 RIE공정에서 생성된 표면결함과 표면 구조로 인한 불완전한 에미터 층 형성과 ARC막의 불균일한 증착으로 인한 두께 불균형이 태양전지의 동작특

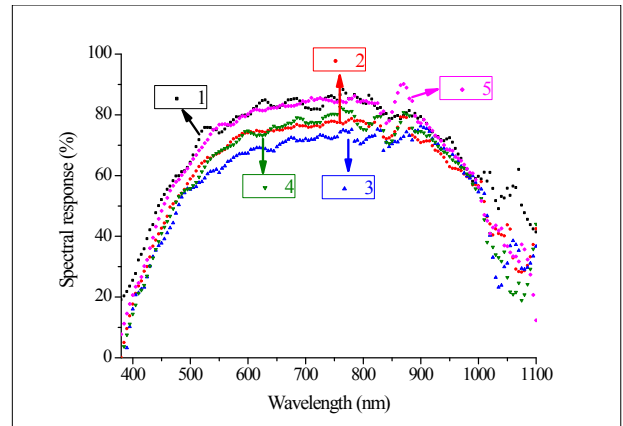


Figure 6. External quantum efficiency for 5 measurement positions.

성에 영향을 미치는 것으로 예상된다. 입사되는 각 파장대역의 광자에 의해 생성되는 전자-정공쌍 중 전극으로 포집되는 비율을 나타내는 외부양자효율은 이러한 특성을 극명히 보여줄 수 있으므로 각 위치에 따른 결과를 측정하였으며 예상된 특성을 잘 나타내는 것으로 밝혀졌다. Fig. 6은 380~1,100 nm 파장을 기준으로 측정된 위치별 외부양자효율 분석결과를 보여주고 있다. 예상한 바와 같이 $3 \times 9 \text{ cm}^2$ 로 절단된 조각 태양전지 중 양쪽 edge에서 최고 양자효율 86% 범위를 나타내었으나 양산 태양전지의 90%대에 5% 정도 낮은 결과를 나타내었고 특히 가시광선대역에서의 더 뚜렷하게 열화된 특성을 나타내었다. 더하여 위치별 결과를 살펴보면 중앙 부분에서 측정된 외부양자효율은 최대값이 70%대로 양쪽 edge에 비해서 15% 이상 저하된 것을 확인하였고 중간 부분은 중앙과 edge의 중간에 해당하는 양자효율을 나타냄을 볼 수 있다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때 RIE texturing을 적용하여 고효율의 다결정 실리콘 태양전지양산을 위해서는 충분히 긴 소수운반자수명의 확보가 필수적이므로 texturing 공정조건의 적절한 제어를 통해 적절한 반치폭과 동시에 최저 반사율을 나타낼 수 있도록 표면형상구조가 최적화 되어야 한다. 즉 최적화된 형상을 얻기 위해서는 표면 구조의 side wall 각도를 조절하여 반사율은 조금 높더라도 도핑 공정 생성된 전자-정공쌍의 이동을 원활히 제어할 수 있는 적절한 표면 구조가 요구된다. 따라서 대략 10%대의 반사율과 깊이와 폭의 비 즉 aspect ratio가 대략 1~1.5 정도인 표면구조가 최적일 것으로 예상된다.

IV. 결 론

최저 반사율을 목표로 표면 texturing 공정이 수행된 다결정실리콘 웨이퍼에 대해 위치에 따라 반사율, 소수운반자수명 및 표면구조 분석을 실시하였고 texturing 공정 후 제작된 15.6×15.6 cm² 태양전지 전체 동작특성과 더불어 특정부위를 포함하는 3×9 cm²로 절단된 태양전지의 동작 특성을 분석하여 광전변환효율에 영향을 미치는 핵심적인 원인을 규명하고자 하였다. 본 연구에서 310~1,100 nm 파장대역의 평균 반사율이 4%대이고 전체 웨이퍼에 걸쳐 ±1% 내외의 위치에 따른 평균반사율 분포를 갖는 SF₆/O₂ 기반의 RIE texturing 공정을 실시하였으며, 평균반사율의 차이는 바로 표면구조의 깊이가 중앙에서 양쪽 edge로 갈수록 깊어져 다중산란확률의 증가에 기인하는 것으로 밝혀졌다. ARC 증착으로 평균반사율은 1%대로 더욱 낮아질 것으로 분석되었으며 동시에 RIE texturing에 따른 표면 결함의 passivation 효과와 에미터 층 형성에 의해 소수운반자 수명은 2배 이상 증가되는 것으로 밝혀졌다. 제작된 태양전지의 위치에 따른 광전변환효율은 center 부분이 8%, 양쪽 edge가 10%대의 효율을 보였으며 양쪽 middle은 9%대의 중간값을 보여 소수운반자수명과 반사율 분포결과와 잘 부합되는 것으로 밝혀졌다. 동일 웨이퍼내 위치에 따른 광전변환효율 변화의 원인을 규명하고자 측정된 외부양자효율은 고효율 태양전지에 비해 15% 이상 감소된 양자효율을 나타내었다. 결론적으로 평균반사율을 낮추어 더 많은 광선속의 투과와 그에 따른 흡수율의 증가를 통해 고효율 태양전지를 제조하기 위해서는 일부 반사율의 손실이 발생하더라도 RIE 공정조건의 제어를 통해 소수운반자수명이 충분히 긴 표면 texture 구조제작이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 지식경제부, 한국산업기술진흥원, 대경광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업의 연구비에 의해서 수행됨.

참고문헌

- [1] S. Narayanan, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **74**, 107 (2002).
- [2] A. Goetzberger, C. Hebling, and H. W. Schock, Mater. Sci. Eng. R **40**, 1 (2003).
- [3] 이재형, 임동건, 이준신, *태양전지 원론*, (홍릉과학출판사, 서울, 2005) pp. 281-285, pp. 358-365.
- [4] J. S. Yoo, I. O. Parm, U. Gangopadhyay, K. H. Kim, S. K. Dhungel, D. Mangalaraj, and J. S. Yi, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **90**, 3085 (2006).
- [5] H. F. W. Dekkers, F. Duerinckx, J. Szlufcik, and J. Nijs, Opto-electron. rev. **8**, 311 (2000).
- [6] G. Kumaravelu, M. M. Alkaisi, A. Bittar, D. Macdonald, and J. Zhao, Curr. Appl. phys. **4**, 108 (2004).
- [7] M. S. Yun, D. H. Hyun, B. J. Jin, J. Y. Choi, J. S. Kim, H. D. Kang, J. Yi, and G. C. Kwon, J. Korean Vacuum Soc. **19**, 114 (2010).
- [8] I. G. Park, M. S. Yun, D. H. Hyun, B. J. Jin, J. Y. Choi, J. S. Kim, H. D. Kang, and G. C. Kwon, J. Korean Vacuum Soc. **19**, 314 (2010).
- [9] G. H. Kennedy, *Vacuum Technology* (Prentice-Hall, New York, 2005) pp. 88-105.
- [10] Y. Inomata, K. Fukui, and K. Shirasawa, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **48**, 237 (1997).
- [11] Saleem H. Zaidi, SAND2000-0919, Sandia contact #BE-8229, April 2000.
- [12] K. S. Lee, M. H. Ha, J. H. Kim, and J. W. Jeong, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **95**, 66 (2011).
- [13] G. Kumaravelu, M. M. Alkaisi, D. Macdonald, J. Zdao, B. Rong, and A. Bittar, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **87**, 99 (2005).
- [14] E. J. Teo, M. Alkaisi, A. A. Bettiol, T. Osipowicz, J. V. Kan, F. Watt, and A. Markwitz, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B **190**, 339 (2002).
- [15] M. Gloeckler, *DEVICE PHYSICS of Cu(In,Ga)Se₂ THIN-FILM SOLAR CELLS*, Ph.D DISSERTATION, Colorado State University, June, 2005.

Investigation on the Electrical Characteristics of mc-Si Wafer and Solar Cell with a Textured Surface by RIE

Kwang Mook Park^a, Jee Hee Jung^b, So Ik Bae^b, Si Young Choi^a, and Myoung Bok Lee^{c*}

^a*KyungPook National University, Daegu 702-701*

^b*MillinetSolar Co. Ltd., Daegu 704-947*

^c*Nano Convergence Practical Application Center, Daegu 704-801*

(Received January 5, 2011, Revised April 27, 2011, Accepted May 2, 2011)

Reactive ion etching (RIE) technique for maskless surface texturing of mc-silicon solar wafers has been applied and succeed in fabricating a grass-like black-silicon with an average reflectance of $4\pm 1\%$ in a wavelength range of 300~1,200 nm. In order to investigate the optimized texturing conditions for mass production of high quantum efficiency solar cell, Surface characteristics such as the spatial distribution of average reflectance, microscopic surface morphology and minority carrier lifetime were monitored for samples from saw-damaged $15.6\times 15.6\text{ cm}^2$ bare wafer to key-processed wafers as well as the mc-Si solar cells. We observed that RIE textured wafers reveal lower average reflectance along from center to edges by 1% and referred the origin to the non-uniform surface structures with a depth of 2 times deeper and half-maximum width of 3 times. Samples with anti-reflection coating after forming emitter layer also revealed longer minority carrier lifetime by 40% for the edge compared to wafer center due to size effects. As results, mc-Si solar cells with RIE-textured surface also revealed higher efficiency by 2% and better external quantum efficiency by 15% for edge positions with higher height.

Keywords : mc-Si solar cell, Reactive ion etching, Texturing, Saw damage, Minority carrier lifetime

* [E-mail] mblee@npac.or.kr