

## 표면결합식각 및 반사방지막 열처리에 따른 태양전지의 효율 개선

조찬섭\* · 오정화\*\* · 이병렬\*\*\* · 김봉환\*\*\*\*†

\*경북대학교 산업전자공학부, \*\*삼성전자, \*\*\*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부,  
†\*\*\*\*대구가톨릭대학교 전자공학과

### Silicon Solar Cell Efficiency Improvement with surface Damage Removal Etching and Anti-reflection Coating Process

Chan Seob Cho\*, Jeong Hwa Oh\*\*, Byeungleul Lee\*\*\* and Bong Hwan Kim\*\*\*\*†

\*School of Electrical Engineering, Kyungpook National University, \*\*Samsung Electronics,

\*\*\*School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

†\*\*\*\*Department of Electronics Engineering, Catholic University of Daegu

#### Abstract

In this study general solar cell production process was complemented, with research on improvement of solar cell efficiency through surface structure and thermal annealing process. Firstly, to form the pyramid structure, the saw damage removal (SDR) processed surface was undergone texturing process with reactive ion etching (RIE). Then, for the formation of smooth pyramid structure to facilitate uniform doping and electrode formation, the surface was etched with HND(HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water=5 : 100 : 100) solution. Notably, due to uniform doping the leakage current decreased greatly. Also, for the enhancement and maintenance of minority carrier lifetime, antireflection coating thermal annealing was done. To maintain this increased lifetime, front electrode was formed through Au plating process without high temperature firing process. Through these changes in two processes, the leakage current effect could be decreased and furthermore, the conversion efficiency could be increased. Therefore, compared to the general solar cell with a conversion efficiency of 15.89%, production of high efficiency solar cell with a conversion efficiency of 17.24% was made possible

**Key Words** : Solar cell, RIE texturing, HND process, DRE(damage removal etching), ARC

#### 1. 서 론

최근 몇 년간 침체된 세계 경제는 미래 에너지 산업인 태양전지 시장의 성장을 어렵게 하였다. 하지만 기존 화석 연료와는 다르게 무한한 태양에너지를 이용하는 태양전지는 미래 지향적인 사업이기 때문에 현재에도 고효율, 저가격화를 위한 연구가 계속적으로 진행 중이다. 현재 태양전지 시장의 대부분을 차지하는 결정형 실리콘 태양전지는 이론적인 변환 효율에 도달하기 위한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 일반적인 결정형 실리콘 태양전지 제작은 먼저 실리콘 습식 식각 용액으로

기판의 절삭 손상된 부분을 식각한 후 텍스처링 공정으로 표면에 요철을 형성하여 입사하는 태양광의 표면 반사율을 감소시키고, 흡수율을 증가시킨다[3,4]. 도핑 공정으로 에미터를 형성하고 반사방지막을 증착한 후, 기판의 전면과 후면에 금속 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄법으로 전극을 형성한다. 마지막으로 형성된 전극을 고온에서 소성공정으로 에미터와 접촉시켜 일반적인 결정형 실리콘 태양전지를 제작한다[1]. 습식 식각 공정으로 진행되는 텍스처링 공정은 기판의 두께가 점차 얇아지고, 기판의 종류가 다양해지고 있는 현재의 태양전지 시장을 충족하기에는 한계에 도달하였다. 최근에는 기존의 습식 식각 공정에 벗어난 RIE를 이용한 건식 식각 공정에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[5-9]. 플라즈마를 이용하는 건식 식각 공정은 최근 화두로

†E-mail : bhkim@cu.ac.kr

떠오르는 환경 오염문제에서 습식 식각 공정 보다 자유롭고, 공정의 개연성이 높기 때문에 많은 주목을 받고 있다[6-9].

텍스처링 공정을 통해 만들어진 피라미드 구조에서 도핑공정을 하게 되면, 골짜기, 경사 그리고 꼭짓점 부분의 균일한 도핑이 이루어지지 않기 때문에, 전극 소성 공정에서 일부의 에미터층을 뚫어버리게 되므로 누설전류가 증가하게 된다[4]. 또한 전극형성 시 표면과 전극 사이의 접착이 좋지 않아, 접촉저항이 커지게 되어 직렬저항이 커지게 되어 직렬저항이 증가한다[7,10]. 반사방지막은 반사율을 줄여주는 역할 뿐만 아니라 반사방지막의 수소가 실리콘의 dangling bond 들과 반응하여 소수 캐리어 수명을 증가시키게 하는 역할도 하는데, 고온에서 이루어지는 소성 공정을 하게 되면 소수 캐리어 수명이 재 감소하게 된다[11].

본 논문에서는 태양전지의 변환 효율을 개선시키기 위해 표면 구조와 반사방지막의 열처리 공정에 대한 연구를 하였다. 피라미드 구조를 식각하여 균일한 도핑 및 전극 형성이 용이하게 하였다. 그리고 반사방지막 형성 후 열처리를 하여 소수 캐리어 수명을 증가시켰으며, 증가된 소수 캐리어 수명을 유지시키기 위해 스크린 인쇄법 대신 Au 도금 공정으로 전면 전극을 형성하였다. 그 후 위와 같은 방법으로 제작된 태양전지와 일반적인 태양전지를 비교 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 피라미드 구조 형성

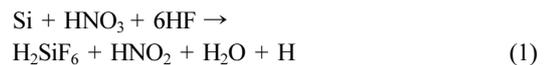
일반적인 단결정 실리콘 웨이퍼 제작 시 표면절삭손상(saw damage)가 존재하게 되는데, 이 때 생긴 결함으로 인해 소수 캐리어 수명이 낮아지게 된다[12-13]. 소수 캐리어 수명을 증가시키기 위해서, KOH 용액에 IPA를 섞어 70°C에서 20분간 식각하였다. 식각된 표면에 피라미드 구조를 형성하기 위해 Table 1의 공정조건에 따라 RIE 텍스처링 하였다. 실험에 사용된 RIE는 (주)올텍에서 제작한 금속 망(metal mesh)을 사용한 장

Table 1. Process condition of RIE texturing.

Process variable	Process condition
Gas ratio	SF <sub>6</sub> : O <sub>2</sub> = 35 : 30 sccm
Pressure	200 mTorr
RF power	200 W
Time	40 min
Temperature	10°C

비로 Fig. 1에 개략적 구조를 나타내었다. 사용된 금속 망은 SUS(stainless 304) 재질에 직경 150 μm의 원형 구멍이 형성되어 있다. RIE 내부에 플라즈마가 발생되고, 플라즈마가 금속 망을 통해 Fig. 1과 같은 궤도를 가지면서 실리콘 웨이퍼 표면에 도달하게 된다. 도달된 플라즈마의 이온들은 실리콘 표면을 충돌하여 표면을 손상시키고, 라디칼들은 실리콘과 반응하여 생성된 S<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub>와 SiF<sub>4</sub>는 휘발하고 Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub>는 표면에 남게 된다. 이 때 자연산화막은 마스크 역할을 하게 되고, 실리콘 표면에 남은 Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>F<sub>z</sub>들이 마스크 역할을 하면서 피라미드 구조가 형성된다[12-15].

RIE 텍스처링 후 이온 충돌로 생긴 표면손상을 제거하고 부드러운 피라미드 구조를 형성하기 위해서 HND용액(HF, HNO<sub>3</sub>, D.I water의 혼합액)을 사용하여 표면을 식각하였다. HND 용액과 실리콘의 반응은 아래 식과 같다.



HNO<sub>3</sub>가 실리콘을 산화시키고, HF는 산화된 실리콘을 제거하며 D.I. water는 촉매역할을 한다[16]. 표면에 형성된 피라미드의 크기를 고려하여 낮은 식각율을 가진 HND 용액이 필요하므로, Table 2의 HND 용액 비율에 따라서 실험을 진행하여, 표면을 식각하기 위한 HND 용액 조건을 최적화하였다

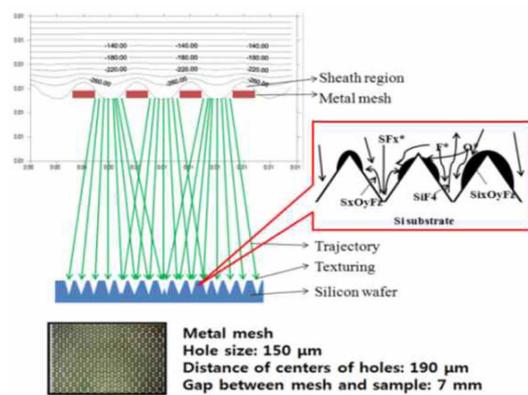


Fig. 1. Principle of RIE texturing within metal mesh.

Table 2. Ratio of HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water.

	HF	HNO <sub>3</sub>	D.I. water
Test 1	1	100	100
Test 2	5	100	100

**2.2. 열처리를 이용한 소수 캐리어 수명 개선**

반사방지막 증착 후 소수 캐리어 수명을 극대화하기 위하여 N<sub>2</sub> 분위기의 퍼니스 장비를 이용하여 350°C~550°C의 온도구간에서 각각 30분 및 45분간 열처리 실험을 하였다. 그리고 열처리 후 소수 캐리어 수명과 반사율을 측정하여 반사방지막 열처리 조건을 최적화하였다.

**2.3. 태양전지 제작**

RIE 텍스처링 공정된 태양전지와 태양전지의 표면 구조 및 반사방지막 열처리 공정으로 효율을 개선한 태양전지를 제작하여 특성을 비교 분석하였다. 본 논문에서는, RIE 텍스처링을 이용한 태양전지 제작 공정을 보완하여 태양전지의 표면 구조 및 열처리 공정으로 효율을 개선하기 위한 연구를 하였다. RIE 텍스처링으로 형성된 피라미드 구조를 식각하여 균일한 도핑 및 전극 형성이 용이하게 하였다. 그리고 반사방지막 형성 후 열처리를 하여 소수 캐리어 수명을 증가시켰으며, 이렇게 증가된 소수 캐리어 수명은 누설전류를 감소시킬 수 있다. 마지막으로 증가된 소수 캐리어 수명을 유지시키기 위해 스크린 인쇄법 대신 Au 도금 공정으로 전면 전극을 형성하였다. 그 후 위와 같은 방법으로 제작된 태양전지와 일반적인 태양전지를 비교 분석하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 제작된 태양전지 공정 흐름도이다. 기판은 p-type, 비저항 0.5~3 Ω·cm, 두께 200 μm, 크기 31.2 × 31.2 mm<sup>2</sup>의 (100)면을 가지는 단결정 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. RIE 텍스처링 공정은 Table 1의 공정조건으로 진행하였으며, 태양전지의 특성을 비교하기 위하여 태양전지 제작 공정 중 RIE 텍스처링 공정, n<sup>+</sup> 형성과 반사방지막 공정, 하부 전극 형성 공정은 동일하게 제작하였다.

**2.3.1 에미터 및 반사방지막 형성**

pn접합을 형성하기 위해 n<sup>+</sup> 도핑 시 도핑농도가 너무 높으면 전위차가 커져서 Voc는 증가하나, 재결합확률이 높아져서 소수캐리어 수명이 감소하고 Ioc가 감소하게 된다. 도핑농도는 약 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> 이상부터는 효율이 저하되므로 5 × 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> 이하의 도핑농도를 적용하였으며, 퍼니스(furnace)에서 POCl<sub>3</sub> 가스를 이용하여 약 50 Ω/□의 면저항을 가지는 에미터 층을 형성하였다.

AM(air mass)1.5에서 태양광의 강도에서 500~600 nm에서 태양광의 강도가 가장 세기 때문에, 이 파장대역에 대한 반사방지막을 증착하는 것이 가장 효율적이다. 따라서, 파장이 약 600 nm의 빛에 대한 반사방지막의

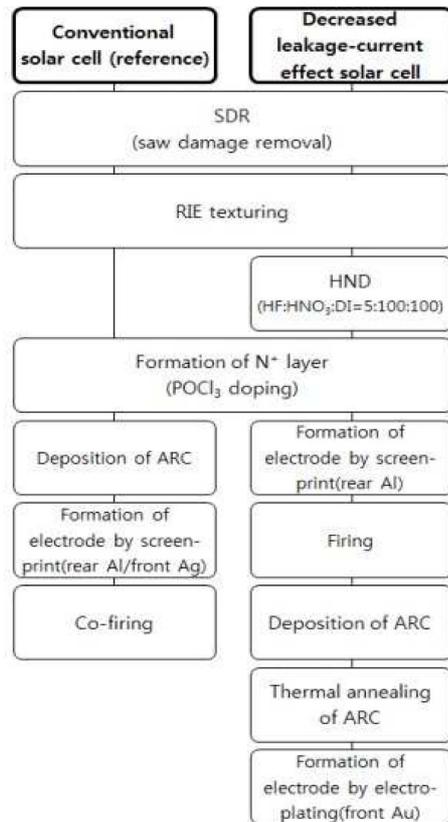


Fig. 2. Solar cell fabrication flow chart.

두께는 약 80 nm가 되므로 PECVD(Plasmalab 80 plus)로 SiN<sub>x</sub>:H를 80 nm 증착하였다.

**2.3.2 전극 형성**

일반적인 태양전지와 비교하기 위해 전면전극의 면적 및 두께는 동일하게 하였다. 일반적인 태양전지는 전면은 Ag paste와 후면은 Al paste를 이용하여 스크린 인쇄법으로 전극을 형성하고, 800~900°C의 고온에서 전극 소성 공정을 한다. 하지만 고온의 소성 공정을 하게 되면 소수 캐리어 수명이 감소된다. 본 실험에서는 반사방지막 열처리를 통해 극대화된 소수 캐리어 수명을 유지시키기 위해서, 전면 전극을 도금 공정을 이용하여 형성하였고, 후면은 일반적인 태양전지와 동일하게 스크린 인쇄법을 이용하여 전극을 형성하였다.

전극 공정 순서로 먼저 웨이퍼 후면 전체에 Al paste를 바른 후 스크린 인쇄법으로 전극을 형성하였다. 오븐에서 paste를 5분 정도 건조한 후 850°C에서 소성 공정으로 후면전계(back surface field, BSF)를 형성하

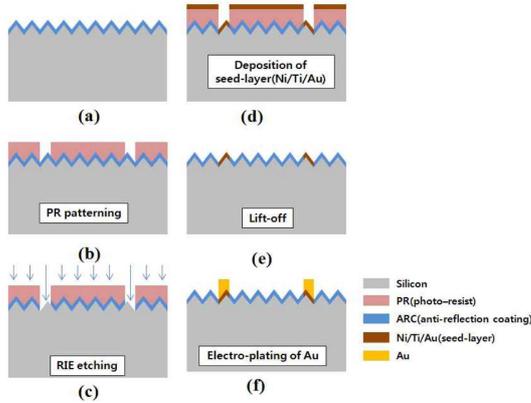


Fig. 3. Solar cell fabrication flow chart.

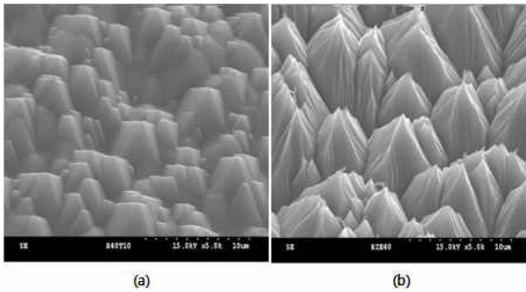


Fig. 4. SEM images of Si surface after (a) SDR and (b) SDR + RIE texturing 40 min.

였다. 그 다음 전면에서 반사 방지막을 증착한 후 최적화된 공정으로 열처리를 하였으며, Fig. 3과 같이 전면 전극을 형성하였다. 사진식각공정으로 전면 전극이 형성될 부분의 반사방지막을 노출시킨 후, RIE로 반사방지막을 식각하였다.

다음으로 Au 도금 공정 전 seed-layer를 증착하였다. Seed-layer는 e-beam evaporator를 이용하여 최적화된 조건인 Ti 20/Ni 70/Au 8 Å의 두께로 증착하였다. 그 후 lift-off 공정으로 seed-layer를 형성하였으며, Au 도금 공정을 하여 전면전극을 제작하였다. Au 도금 공정은 일반적인 태양전지와 같은 두께인 15 μm로 형성하였다. 이렇게 두 종류의 태양전지를 제작한 후 태양전지에 대한 특성을 측정 및 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 표면 분석

Fig. 4(a)는 KOH와 IPA용액을 사용하여 표면 질산 손상을 제거(saw damage removal, SDR)한 표면이며,

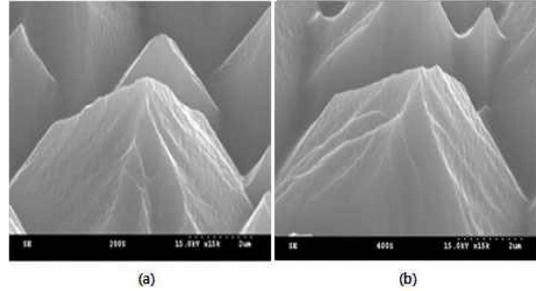


Fig. 5. SEM images of Si surface after HND (HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water = 1 : 100 : 100) etching, (a) 200 sec and (b) 400 sec.

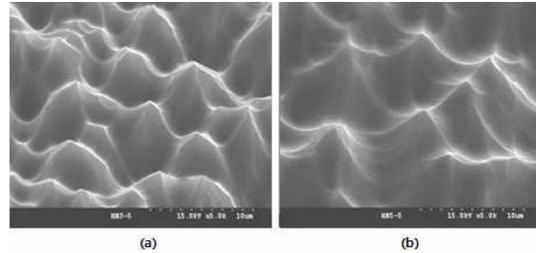


Fig. 6. SEM images of Si surface after HND (HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water = 5 : 100 : 100) etching, (a) 300 sec and (b) 500 sec.

(b)는 SDR 후 RIE를 이용하여 표면 텍스처링을 한 표면이다. 표면에 텍스처링된 피라미드의 크기가 약 3~5 μm인 것을 고려했을 때 나노단위의 식각액을 가진 실리콘 식각용액이 필요하다.

Fig. 5는 HF:HNO<sub>3</sub>:D.I. water = 1 : 100 : 100의 비율로 200초와 400초 동안 식각했을 때의 표면이다. 식각 시간을 두 배 증가시켰음에도 불구하고 HF의 비율이 낮아서 표면의 상태가 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 HF의 비율을 높인 HF:HNO<sub>3</sub>:D.I. water = 5 : 100 : 100의 비율로 표면을 식각한 표면이다. Fig. 6(a)의 300 초 동안 식각한 표면은 피라미드가 식각되어 뾰족했던 표면이 부드러워진 것을 알 수 있었고 500초 동안 식각한 표면은 식각이 많이 되어 표면의 피라미드가 거의 남아 있지 않은 것을 확인하였다.

Fig. 7은 반사방지막 증착 후 표면에 따른 반사율이다. SDR만한 표면의 400~1100 nm에서의 평균반사율은 6.42%이고 RIE 텍스처링을 한 후의 반사율은 5.58%로 반사율이 낮아졌다. 그리고 HND 300 초 후의 반사율은 9.66%로 조금 증가했지만 10% 미만의 반사율을 가졌고, HND 500초 후의 반사율은 12.14%로

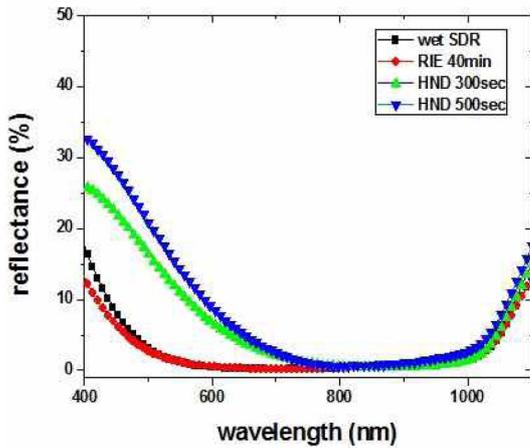


Fig. 7. Reflectance measurement comparisons after anti-reflection coating.

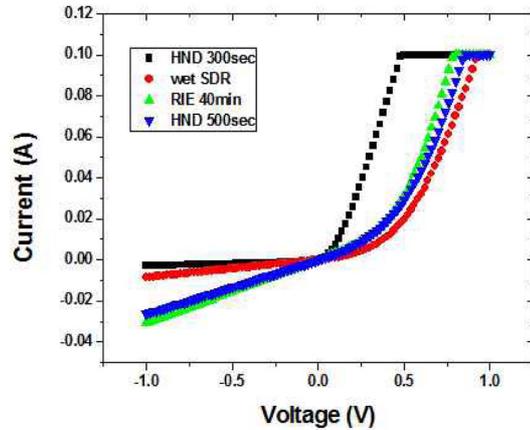


Fig. 9. I-V curve of pn junction diode according to surface.

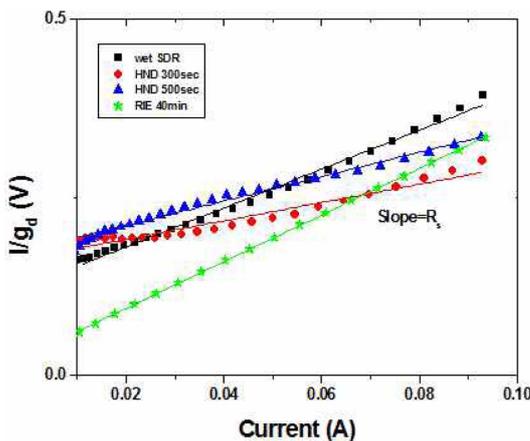


Fig. 8.  $I/g_d$ -I curve of pn junction diode according to surface.

상대적으로 높은 반사율 값을 가지는 것을 확인하였다. 식각 표면의 상태에 따른 p-n 접합의 전기적 특성을 측정하기 위하여 다이오드를 제작하여 특성을 비교하였다. Fig. 8의  $I/g_d$ -I 에서와 같이 HND 300 초의 직렬 저항이  $1.285 \Omega$ 으로 가장 낮은 값을 나타냈다. 직렬 저항은 전극의 자체저항, 전극과의 접촉저항, 에미터와 베이스의 저항성분의 합으로 나타난다. Fig. 9는 각 표면에 따른 전류-전압 곡선이다. 이 때의  $I_0$ 값 또한 HND 300초가  $2.33 \times 10^{-5} A$ 로 가장 낮은 값을 나타냈으며, 반사율이 증가했지만, 측정된  $I_0$ 값과 직렬저항으로 미루어볼 때 HND 300 초의 표면이 다이오드, 즉 태양전지의 제작에 알맞은 표면임을 확인하였다.

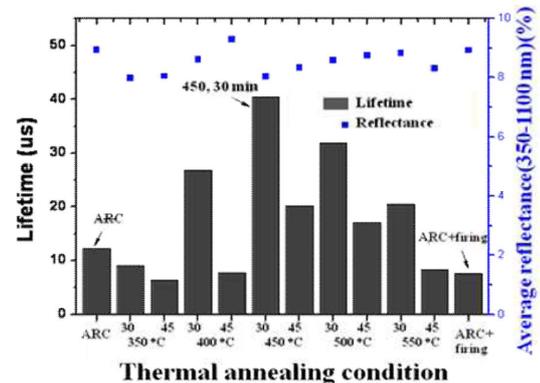


Fig. 10. Minority carrier lifetime and average reflectance with thermal annealing.

### 3.2. 반사방지막 특성

반사방지막 증착 후 소수 캐리어 수명을 개선시키기 위해 열처리를 하였다. Fig. 10은 반사방지막 열처리 후의 소수 캐리어 수명과 반사율을 나타낸 그래프이다. 반사방지막을 증착했을 때의 소수 캐리어 수명은 약  $12 \mu s$ 였다. 그리고 30 분 열처리를 했을 때 소수 캐리어 수명이 증가하는 것을 확인하였다. 그 중에서도  $450^\circ C$  에서 30분간 열처리를 하였을 때  $40 \mu s$ 로 가장 높은 값을 가졌고, 이는 반사방지막의 수소기가 실리콘 dangling bond들과 결합하여 재결합확률을 감소시켰기 때문에 소수 캐리어 수명이 증가하였다. 하지만 소성 공정 후 결합된 수소기가 다시 빠져나가게 되면서 소수 캐리어 수명이 재 감소되므로 고온의 소성 공정의 제외하는 것이 필요하다. 그리고  $450^\circ C$ 에서 30분간 열처리를 하였을 때 평균 반사율 또한 가장 감소하였으

**Table 3.** Jsc, Voc, FF, and efficiency of solar cell comparison

Items	Conventional cell	Decreased leakage-current cell
Jsc(A/m <sup>2</sup> )	40.66	41.34
Voc(V)	0.579	0.6055
FF(%)	67.49	68.88
Efficiency	15.89	17.24

므로 열처리 공정을 최적화할 수 있었다.

### 3.3. 태양전지의 특성 분석

부드러운 피라미드 구조 형성 및 반사방지막 열처리 후 도금 공정으로 전극을 형성하여 태양전지를 제작하였다. 먼저, Reference cell로는 Fig. 2에 따라 일반적인 피라미드 구조의 표면에 스크린 인쇄법으로 전극을 형성하였다. 누설전류에 대한 영향을 감소시킨 태양전지는 반사율과 직렬저항 그리고  $I_0$  값의 결과를 토대로 부드러운 피라미드 구조 형성의 최적화된 조건인 HND(HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water = 5 : 100 : 100) 300초를 적용하였다. 그리고 반사방지막 열처리 공정은 소수 캐리어 수명과 반사율 값을 참고하여 450°C에서 30 분간 열처리공정을 적용하고 Au 도금 공정 전극을 형성하여 제작되었다. 이렇게 제작된 일반적인 태양전지와, 두 가지 공정의 변경으로 누설전류의 영향을 감소시켜 최종적으로 효율을 개선한 태양전지의 단락전류밀도, 개방전압, 곡선인자, 변환효율과 같은 태양전지 특성을 비교 분석하였다.

Table 3은 일반적인 태양전지와, 효율을 개선한 태양전지의 특성을 나타내었다. 누설전류에 대한 영향을 감소시킨 태양전지의 단락전류밀도는 41.34 A/m<sup>2</sup>로 40.66 A/m<sup>2</sup>의 일반적인 태양전지에 비해 0.68 A/m<sup>2</sup> 증가된 것을 확인하였다. 이는 표면의 반사율은 증가하였지만, 직렬저항이 낮아졌을 뿐만 아니라 소수 캐리어 수명이 높아져서 수집되는 캐리어 수가 증가되었기 때문이다. 일반적인 태양전지의 개방전압은 0.579 V였고, 누설전류의 영향을 감소시킨 태양전지의 개방전압은 0.6055 V로 reference cell에 비해 증가된 것을 확인하였다. 개방전압은 단락전류를 포함하고 있기 때문에 단락전류가 증가하면 개방전압 또한 증가하게 된다.

$I_0$ 의 영향을 감소시킨 태양전지 직렬저항이 감소되었을 뿐만 아니라 개방전압과 단락전류 특성이 증가되었기 때문에 곡선인자의 특성이 향상되었다. Reference cell이 67.49%이고 누설전류의 영향을 감소시킨 태양전지는 68.88%로 약 1% 이상 증가된 것을 확인하였다.

변환 효율은 단락전류, 개방전압, 곡선인자에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있었으며, 모든 요소에서 향상된 누설전류에 대한 영향을 감소시킨 태양전지가 17.24%로 reference cell에 비해 1.35% 증가된 것을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는, 일반적인 태양전지 제작 공정을 보완하여 태양전지의 표면구조 및 열처리 공정으로 효율을 개선하기 위한 연구를 하였다. 먼저 피라미드 구조를 형성하기 위해 SDR된 표면에 RIE로 텍스처링을 하였다. 그리고 균일한 도핑과 전극 형성을 용이하게 하는 부드러운 피라미드 구조를 형성하기 위해 HND(HF : HNO<sub>3</sub> : D.I. water = 5 : 100 : 100) 용액을 사용하여 표면을 식각하였다. 특히 도핑을 균일화하여 누설전류를 감소시킬 수 있었다. 또한, 소수 캐리어 수명을 향상 및 유지하기 위해 반사방지막을 열처리 하여 향상된 소수 캐리어 수명을 유지하기 위해 고온 소성 공정이 없는 Au 도금 공정으로 전면전극을 형성하였다. 이러한 두 가지 공정을 변경하여 누설전류의 영향을 줄이고 나아가서는 변환 효율의 증대 또한 확인할 수 있었다. 그리하여 일반 태양전지의 변환효율인 15.89%와 비교했을 때 17.24%의 변환효율을 가진 고효율의 태양전지를 제작할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음. 본 연구는 중소기업청에서 시행한 중소기업기술개발 지원사업(no. SA113540)의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

## 참고문헌

1. Jha, A. R., "Solar cell Technology and Applications", Auerbach Publications, 2009.
2. Dimroth, F., Kurtz, S., "High-efficiency Multi Junction Solar Cells," MRS BULLETIN, Vol. 32, pp. 230-235, 2007.
3. Vazsonyi, E., De Clercq, K., Einhaus, E., Kerschaver, V., Said, K., Poortmans, J., Szlufcik, J., Nijs, J., "Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 57 pp. 179-188, 1999.
4. Iencinella, D., Centurioni, E., Rizzoli, R., Zignani, F., "An optimized texturing process for silicon solar

- cell substrates using TMAH”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 87, pp. 725-732, 2005.
5. Dekkers, H. F. W., Duerinckx, F., Szlufcik, J., Nijs, J., “Silicon surface texturing by reactive ion etching”, *OPTO-Electronics review* Vol. 8, pp. 311-316, 2000.
  6. Yoo, J.S., Parm, I.O., Gangopadhyay, U., Kim, K., Dhungel, S. K., Mangalaraj, D., Yi, J., “Black silicon layer formation for application in solar cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* Vol. 90, pp. 3085-3093, 2006.
  7. Yoo, J. Kim, K., Thamilselvan, M., Lakshminarayn, N., Kim, Y., Lee, J., Yoo, K., Yi, J., “RIE texturing optimization for thin c-Si solar cells in SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> plasma”, *Journal of Physics D: applied physics*, Vol. 41, pp. 125205, 2008.
  8. Mehran, M., Sanaee, Z., Abdolahad, M., Mohajerzadeh, S., “Controllable silicon nano-grass formation using a hydrogenation assisted deep reactive ion etching”. *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 14, pp. 199-206, 2011.
  9. Jansen, H.V., Boer, de M.J., Ma, K., Girones, M., Unnikrishnan, S., Louwerse, M.C., Elwenspoek, M.C., “Black silicon method XI: oxygen pulses in SF<sub>6</sub> plasma”, *journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 20, pp. 1-12, 2010.
  10. Park, H., Lee, J. S., Kwon, S., Yoon, S., Kim, D., “Effect of surface morphology on screen printed solar cells”, *Current Applied Physics*, Vol. 10, pp.113-118, 2010.
  11. Santbergen, R., van Zolingen, R. J. C., “The absorption factor of crystalline silicon PV cells:A numerical and experimental study”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* Vol. 92, pp. 432-444, 2008.
  12. Jo, J., Kong, D., Cho, C., Kim, B., Bae, Y., Lee, J., “Black Silicon of Pyramid Structure Formation According to the RIE Process Condition”, *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol. 20, No. 3 pp. 207-212, 2011.
  13. Dixit, P., Miao, J., “Effect of SF<sub>6</sub> flow rate on the etched surface profile and bottom grass formation in deep reactive ion etching process”, *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 34, pp. 577-582, 2006.
  14. Burtsev, A., Li, Y. X., Zeijl, H. W., Beenakker, C. I. M., “An anisotropic U-shaped SF<sub>6</sub>-based plasma silicon trench etching investigation”, *Microelectronic Engineering* Vol. 40, pp. 85-97, 1998.
  15. Jansen, H., de Boer, M., Burger, J., Legtenberg, R., Elwenspoek, M., “The black silicon method II: The effect of mask material and loading on the reactive ion etching of deep silicon trenches”, *Microelectronic Engineering* Vol. 27, pp. 475-480, 1995
  16. Robbins, H., Schwartz, B., “Chemical etching of silicon 1”, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.106, pp.505 -508, 1961.
- 
- 접수일: 2014년 5월 28일, 심사일: 2014년 6월 11일,  
 게재확정일: 2014년 6월 20일