

## 웨이퍼 접착 텍스처링 방식을 이용한 다결정 실리콘 태양전지 제조

윤석일 · 노시철 · 최정호 · 정종대 · 서화일<sup>†</sup>

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 전기전자통신공학과

### Fabrication of Multi-crystalline Silicon Solar Cell by using Wafer Adhesion Texturing Method

Seok-II Yoon, Si-Cheol Roh, Jeong- Ho Choi, Jong-Dae Jung and Hwa-II Seo<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Dept. of Electrical & Electronic & Communication Engineering,  
Korea University of Technology and Education

#### ABSTRACT

In this study, the texturing and the emitter formation processes were carried out with the wafer adhesion method to increase the productivity and reduce the production cost of the multi-crystalline silicon solar cell. After fabricating 156x156mm solar cell according to the wafer adhesion method, the operation characteristics were analyzed and compared with those of the solar cell fabricated by the standard process method. In the case of a solar cell formed by the wafer adhesion method, it showed Jsc of 32.87 mA/cm<sup>2</sup>, Voc of 0.612V, FF of 78.04% and efficiency of 15.71% respectively. The efficiency of the solar cell formed by the wafer adhesion method was 0.1% higher than that of the solar cell formed by the standard method. In addition, the productivity of the texturing and the emitter formation processes is expected to be approximately doubled. Therefore, it is expected that the manufacturing cost of the multi-crystalline solar cell can be reduced due to the improved productivity compared with the standard process.

**Key Words** : Multi crystalline silicon solar cell, Texturing, Wafer adhesion, Cell productivity

#### 1. 서 론

세계 태양광 시장은 글로벌 경기침체에도 불구하고 강한 성장세를 지속하고 있다[1]. 이러한 태양광 성장의 밑거름은 태양광 기술의 눈부신 발전에 따른 발전단가 하락에 기인한다[1]. 폴리실리콘 가격이 상승함에도 불구하고 태양전지 가격은 소폭 하락 중이며, 올해 초 \$0.34/W로 시작한 다결정 태양전지 가격은 현재 \$0.3/W로 약 10% 가량 하락한 상황이다[1]. 앞으로도 업체들의 기술발전에 따른 결정질 웨이퍼 가격이 빠르게 떨어지고 있으며, 선도 기업간 태양전지의 생산 단가 경쟁도 계속될 것으로 전

망된다[1].

현재 태양전지 산업에서 가장 중요한 이슈는 효율 향상과 생산 비용 절감이다. 효율을 높이기 위하여, 빛의 표면 반사 손실을 줄이는 텍스처링(texturing), 반사방지막(Anti-Reflection Coating, ARC) 형성, 표면 패시베이션(surface passivation), 태양전지 후면에서의 전자-정공쌍(Electron-Hole Pair, EHP)의 재결합(recombination) 손실을 방지하는 후면 전계(Back Surface Field, BSF) 형성, 전·후면 전극 구조 개선 등 다양한 공정에 대한 연구가 이루어지고 있다[2]. 생산 비용 절감은 태양전지 웨이퍼의 두께 감소 및 제조 공정 개선을 통해 수율과 생산성을 향상시켜 달성할 수 있다[2].

본 논문에서는 공정의 단순성과 경제성뿐만 아니라 태양전지의 효율을 개선시키기 위해 두 웨이퍼를 용액을

<sup>†</sup>E-mail: hiseo@koreatech.ac.kr

이용해 접착시켜 텍스처링하는 웨이퍼 접착 텍스처링 방법(wafer adhesion texturing method)을 연구하였다. 먼저 태양전지용 다결정 실리콘 웨이퍼의 산(acid) 용액을 이용한 표준 텍스처링 공정의 최적화를 진행하였다. 최적화 공정 조건을 찾기 위하여, 텍스처링 공정의 온도 및 시간에 따른 소수캐리어 수명(minority carrier lifetime) 및 반사율(reflectivity)을 측정하여 비교·분석하였다. 또한 웨이퍼 접착 방식을 이용한 텍스처링 및 에미터 형성 공정으로 제작한 태양전지와 표준 방식으로 제작한 태양전지의 효율을 비교·분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 표준 텍스처링 공정 최적화

본 연구에서는 먼저 다결정 실리콘 웨이퍼의 표준 텍스처링 공정 최적화를 위한 실험을 수행하였으며, Fig 1은 그 순서를 나타낸다.

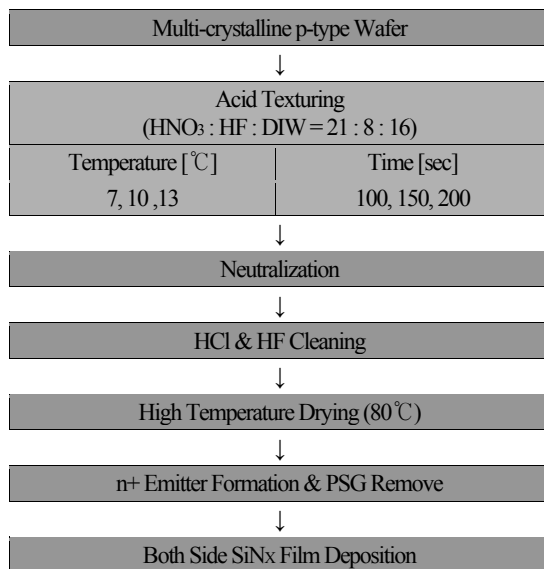


Fig. 1. The experiment sequence for the optimization of the standard texturing process.

실험을 위하여 붕소(Boron, B)가 도핑된 CZ p형 다결정 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며, 사양은 비저항(resistivity) 1~3.0Ωcm, 두께 200±20μm, 크기 156×156mm 였다.

텍스처링 공정은 산 용액을 이용한 습식 방식으로 진행하였으며, 사용된 혼합 용액은 질산(HNO<sub>3</sub>), 불산(HF), 초순수(De-ionized Water, DIW)을 각각 21 : 8 : 16 (vol. %) 비율로 희석하여 제조하였다. 공정 중 발생하는 다량의 증기

(fume)를 최소화시키고 식각량 및 미세공(pore) 크기의 최적화 조건을 찾기 위하여 공정 온도 7, 10, 13°C에서 100, 150, 200초 동안 텍스처링 공정을 진행하였으며, 혼합 용액의 온도는 칠러(chiller) 장비를 사용하여 낮은 공정 온도를 유지하였다.

텍스처링 공정으로 웨이퍼 표면에 생성된 화학적 불순물과 얼룩을 제거하고, n형 에미터 (emitter) 형성 공정 후의 면저항(sheet resistance) 균일도 향상을 위해 중성화(neutralization) 공정을 5% 수산화칼륨(KOH) 용액을 사용하여 상온에서 70초 동안 진행하였다.

텍스처링 공정 시 발생하는 금속 불순물 제거를 위해 1차 세정 공정을 5% 염산(HCl) 용액을 사용하여 상온에서 60초 동안 진행하였다. 또한 웨이퍼 표면에 생성된 얇은 산화막을 제거하기 위해 2차 세정 공정을 5% HF 용액을 사용하여 상온에서 60초 동안 진행하였다. 이어서 웨이퍼 표면에 남아있는 수분을 제거하기 위하여 80°C 고온에서 10분 동안 웨이퍼 건조를 진행하였다. 건조 공정 후, 텍스처링 공정으로 웨이퍼 표면에 생성된 다공성(porosity) 구조의 상태를 확인하기 위해 컬러 3D 레이저 현미경 장비(KEYENCE, VK-9700K)를 이용하여 웨이퍼 표면을 관찰하였다.

건조된 웨이퍼를 인(Phosphorus, P)이 함유된 POCl<sub>3</sub> 가스 및 tube furnace 장비를 이용하여 열 확산(thermal diffusion) 방식으로 웨이퍼 표면에 n형 에미터를 형성하였다. 웨이퍼 표면에 형성된 인실리케이트글라스(Phosphorus Silicate Glass, PSG)를 제거하기 위해 웨이퍼를 5% HF 용액에 3분간 처리하였다. 모든 습식 공정 후에는 5분 동안의 DIW Rinse를 진행하였다.

마지막으로 PECVD(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) 장비(AMAT, P-5000)를 사용하여 웨이퍼 양면에 100nm 질화막(Silicon Nitride, SiN<sub>x</sub>)을 증착하였다.

완성된 시료들의 소수캐리어 수명과 반사율은 QSSPC (Quasi-Steady-State-Photoconductance) 장비(Sinton, VCT-120)와 UV-Vis Spectrometer (JASCO, V-670) 장비를 사용하여 측정하였다.

### 2.2 다결정 태양전지 제조

Fig 2는 표준 및 웨이퍼 접착 방식을 적용한 다결정 태양전지 제조 순서를 나타낸다.

태양전지 제작을 위하여 실험 2.1에서 사용한 것과 동일한 웨이퍼를 사용하였다.

텍스처링 공정은 실험 2.1에서 검증된 최적화된 공정 조건으로 진행하였다. 표준 방식과 접착 방식으로 HNO<sub>3</sub> : HF : DIW = 21 : 8 : 16 (vol. %) 비율의 혼합 용액을 사용하여 공정 온도 7°C에서 150초 동안 진행하였다.

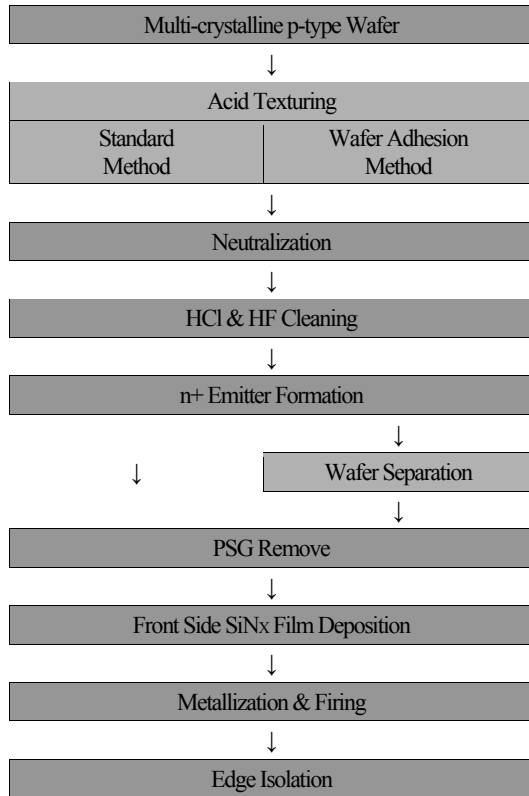


Fig. 2. The experiment sequence for the fabrication of the multi-crystalline silicon solar cell.

웨이퍼 접착 방식의 경우, 웨이퍼 카세트의 각 홈에 두 장의 웨이퍼를 삽입해 텍스처링 용액에 담가서 공정을 진행하게 된다. 이때 두 장의 웨이퍼는 용액의 표면장력에 의하여 접착하게 되고, 그 상태로 텍스처링 된다. Fig 3은 홈에 웨이퍼를 한 장만 삽입한 표준 방식과 두 장을 삽입한 웨이퍼 접착 방식으로 장착된 카세트의 사진을 나타낸다.

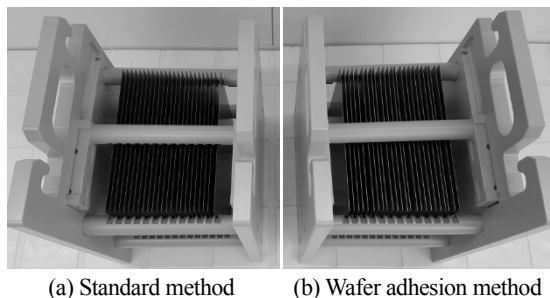


Fig. 3. The cassette image according to the standard method and the wafer adhesion method.

텍스처링 공정 후, 중성화 공정, 세정 공정 등은 실험 2.1에서와 동일하게 진행하였으며, 모든 습식 공정 후에는 5분 동안의 DIW Rinse를 진행하였다.

웨이퍼 접착 방식으로 텍스처링을 진행한 웨이퍼들의 경우, 웨이퍼가 두 장씩 접착되어 있는 상태로 열 확산 방식으로 웨이퍼 표면에 n형 에미터를 형성하였다. 확산 공정이 끝난 후, 두 장씩 접착되어 있는 웨이퍼들을 분리하였으며, 5% HF 용액에 3분간 처리하여 PSG를 제거시켜 주었다.

PSG 제거 후 반사방지막으로써 SiNx를 양산용PECVD 장비를 이용하여 모든 웨이퍼 전면에 증착하였다. 증착된 SiNx은 두께 75nm, 굴절률 2.00~2.05의 특성을 가진다.

금속전극 형성(metallization) 공정은 보급형 태양전지에 널리 사용되고 있는 스크린 프린트(screen print) 방식으로 전·후면 전극을 형성하였다. 스크린 프린트 공정 후, 벨트(belt)형 소성(firing) 장비를 사용하여 co-firing을 해주어 증착된 전·후면 전극을 옴 접촉(ohmic contact) 시켰다. 소성 조건은 벨트 속도 110mm/s, 온도 975℃ 이다. 소성 공정 후, 태양전지 측면에서의 불순물에 의한 누설전류를 방지하기 위해 다이아몬드 줄을 이용한 물리적 방식으로 p-n 접합 분리(edge isolation)를 진행하였다.

완성된 태양전지의 특성을 분석하기 위해 solar simulator 장비를 이용하여 25℃, AM1.5G 조건에서 단락전류밀도(Jsc), 개방전압(Voc), 곡선인자(FF), 변환효율(efficiency) 값들을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 표준 방식 텍스처링 공정 최적화

##### 3.1.1 텍스처링 공정 온도에 따른 웨이퍼 표면 상태 및 시각량 변화

양산의 표준 방식 텍스처링 공정을 적용한 다결정 실리콘 웨이퍼의 경우, 약 0.5~0.6g 시각되며, 표면에 약 4~11 μm 크기의 pores로 이루어진 porosity 구조가 형성된다[4].

Fig 4는 텍스처링 온도에 따른 웨이퍼 표면의 3D 현미경 사진을 나타내며, Table 1은 텍스처링 온도에 따른 웨이퍼 시각량과 pore 크기 및 높이를 나타낸다.

공정 온도가 높을수록 웨이퍼 시각량 및 표면의 pore 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig 4의 (a)와 Table 1의 (a)를 통하여 7℃에서 150초 동안 텍스처링 공정을 진행한 다결정 실리콘 웨이퍼의 경우 0.65g 시각되며, 표면에도 6.37μm 정도의 균일한 pore 구조가 형성됨을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 양산 텍스처링 공정과 비슷한 웨이퍼 시각량과 균일한 pore 크기를 보이는

공정 온도 7°C가 최적 조건으로 판단된다.

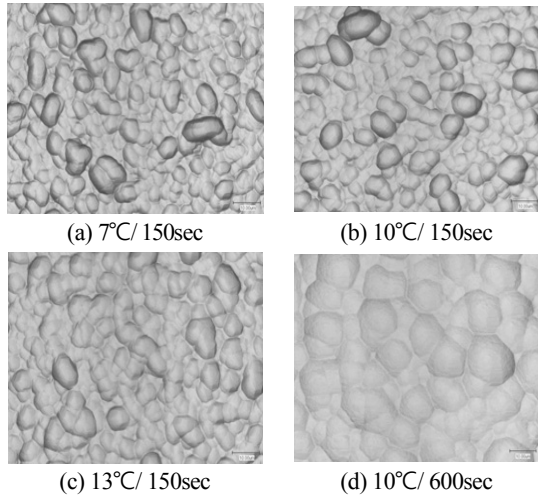


Fig. 4 The wafer surface images of the multi-crystalline silicon wafers according to the texturing temperature.

Table 1. The wafer etching rate and the pore size according to the texturing temperature

Sample	Temperature (°C)/Time(sec)	Etching rate(g)	Pore size width/height (μm)
(a)	7/150	0.65	6.37/1.51
(b)	10/150	0.79	8.28/1.73
(c)	13/150	0.87	8.41/1.23

3.1.2 텍스처링 공정 온도에 따른 소수캐리어 수명 변화

Fig 5는 에미터 형성 및 추가적인 SiNx 증착 공정 후의 텍스처링 온도에 따른 다결정 실리콘 웨이퍼의 소수캐리어 수명을 나타낸 것이다.

공정 시간 150초 조건에서 텍스처링 공정을 진행한 웨이퍼에 n형 에미터 형성 후 측정된 소수캐리어 수명은 7°C 조건에서 8.75μs로 가장 높았으며, 텍스처링 공정 온도가 높아짐에 따라 소수캐리어 수명이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한, SiNx 증착 후 소수캐리어 수명을 측정한 결과 역시 7°C 조건에서 17.21μs로 가장 높은 값을 보였다. 그러므로 텍스처링 공정 온도는 7°C 정도가 가장 적합할 것으로 판단되며, 텍스처링 공정 온도를 낮게 가져가는 것이 높은 소수캐리어 수명을 보이므로 태양전지 제조 후 변환효율이 더 높을 것으로 예상된다.

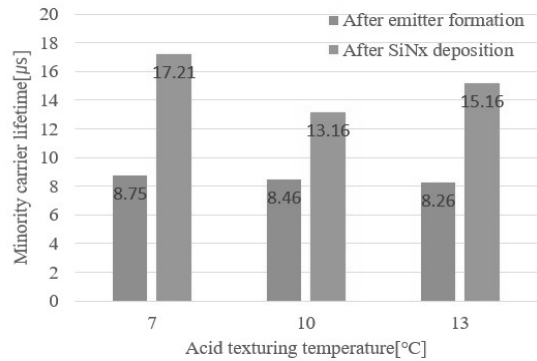


Fig. 5. The minority carrier lifetime of the multi-crystalline silicon wafers according to the texturing temperature.

3.1.3 텍스처링 시간에 따른 표면 상태 및 시료의 반사율 변화

Fig 6은 텍스처링 공정 시간에 따른 웨이퍼 표면의 상태를 보여주며, Table 2는 텍스처링 공정 시간에 따른 웨이퍼의 식각량, 반사율, pore 높이를 나타낸다. 반사율 측정은 텍스처링 공정 및 추가적인 SiNx 증착 후 이루어졌다.

텍스처링 공정 시간이 증가할수록 웨이퍼 식각량 및 반사율은 증가하였고, 표면의 pore 높이는 감소하는 것을 알 수 있었다. 텍스처링 공정 후 반사율은 100초 조건에서 26.88%로 가장 낮았지만, SiNx 증착 후에는 150초 조건에서 10.92%로 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 토대로 양산 텍스처링 공정의 웨이퍼 식각량과 비슷한 결과와 균일한 pore 높이를 보이는 150초가 공정 시간으로 적합할 것으로 판단된다.

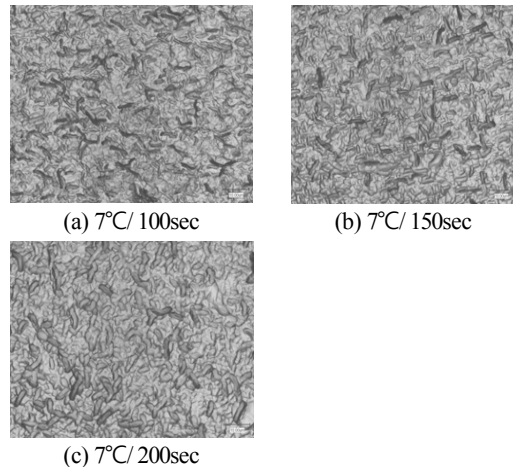


Fig. 6. The wafer surface images of the multi-crystalline silicon wafers according to the acid texturing time.

**Table 2** The wafer etching rate, the reflectivity and the pore size according to the texturing time

Sample	Temperature (°C) /Time (sec)	Etching rate (g)	Reflectivity after texturing (%)	Reflectivity after SiNx deposition (%)	Pore Height ( $\mu\text{m}$ )
(a)	7/100	0.23	26.68	11.42	2.27
(b)	7/150	0.50	27.74	10.92	1.76
(c)	7/200	0.70	28.87	11.29	1.26

### 3.2 다결정 태양전지 제조

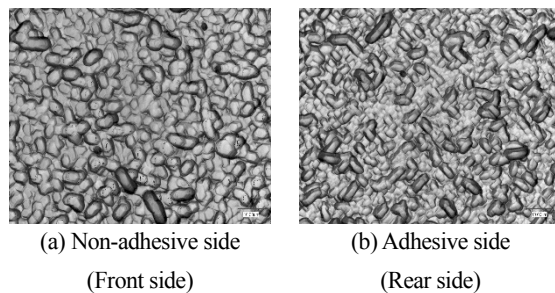
#### 3.2.1 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 비교

실험 3.1에서 표준 방식 텍스처링의 최적의 공정 조건은 7°C/150초이었으며, 이 공정 조건으로 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정을 수행하였다.

Fig. 7은 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정 후 웨이퍼 표면을 3D 현미경으로 측정한 사진을 나타낸 것이다.

웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정 후 웨이퍼 식각량은 0.5~0.6g 정도이었고, pore 크기는 전면인 비접착면은 폭 6.2 $\mu\text{m}$ 와 높이 1.7 $\mu\text{m}$  후면인 접착면은 폭 3.8 $\mu\text{m}$ 와 높이 1.4 $\mu\text{m}$ 로 형성되었다. 이와 같이 전면에는 표준 방식 텍스처링 공정과 비슷한 크기의 pore들이 균일하게 형성되었으며, 접착면인 후면에서는 전면 보다 pore 크기가 작게 형성되었다. 후면의 작은 pore 구조로 인하여, 태양전지에서 후면 금속을 형성할 때, 보다 균일한 BSF층을 형성하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

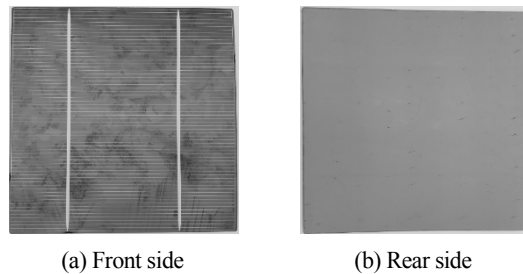
반사율은 27.22%로 표준 방식의 텍스처링 공정 방식과 비슷한 반사율이 측정되었다. 따라서 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정을 표준 방식 텍스처링 공정을 대신하여 사용해도 무방할 것으로 예상된다.



**Fig. 7.** The wafer surface images of the multi-crystalline silicon wafers according to the wafer adhesion texturing method.

#### 3.2.2 제조된 태양전지 특성 비교

표준 방식 텍스처링 공정과 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정을 이용하여 표준 스크린 프린트 방식으로 진행하였다.



**Fig. 8.** The images of the fabricated solar cell.

**Table 3.** The comparison of the fabricated solar cells characteristics

	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eff. (%)
Standard method	0.614	32.88	77.89	15.62
Wafer adhesion method	0.612	32.87	78.04	15.71

Fig. 8은 제조된 다결정 실리콘 태양전지의 전·후면의 이미지를 나타내며, Table 3은 표준 방식 및 웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정으로 제조된 태양전지의 특성 값을 나타낸 것이다.

웨이퍼 접착 방식 텍스처링 공정을 이용한 태양전지는 Jsc 32.87mA/cm<sup>2</sup>, Voc 0.612V, FF 78.04%, efficiency 15.71%를 얻을 수 있었으며, 상대적으로 표준 방식 텍스처링 공정으로 제작된 태양전지 보다 변환효율이 0.1%가 높았다. Jsc 및 Voc는 비슷한 값을 보였으며, FF는 다소 증가되었다. 이는 웨이퍼 접착 방식이 후면의 작은 pore 구조로 인해 보다 균일하고 우수한 접촉성을 가지는 전극 형성이 가능했던 것으로 해석될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다결정 실리콘 태양전지의 생산성 증가와 생산비용 감소를 위해 웨이퍼 접착 방식을 이용하여 텍스처링 및 n형 에미터 형성 공정을 진행하였으며, 156x156mm 태양전지를 제작한 후 웨이퍼 접착 유무에 따른 효율을 비교·분석하였다.

산 용액을 이용한 다결정 실리콘 웨이퍼의 최적화된 텍스처링 공정 조건은 7°C, 150초 이었으며, 웨이퍼 접착 방식으로 제조한 다결정 실리콘 태양전지는  $J_{sc}$  32.87mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}$  0.612V, FF 78.04%, efficiency 15.71%를 얻을 수 있었으며, 기존의 표준 공정보다 0.1% 정도 효율이 향상되었다. 또한 단일 공정 진행을 통한 텍스처링 및 에미터 형성 공정의 생산성이 약 2배 향상될 것으로 예상된다. 따라서 기존의 표준 공정보다 효율 향상뿐만 아니라 생산성 증가에 따른 제조원가 감소를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- Jung-Hwa Kang, "Photovoltaic industry trend in the first quarter of 2016", The Export-Import Bank of Korea, (2016).
- Si-Cheol Roh, "A study on ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films for rear surface passivation of crystalline silicon solar cells", Master Thesis, Korea University of Technology and Education, (2011).
- The Export-Import Bank of Korea, "World PV market trends and major financial support models", The Export-Import Bank of Korea, (2015).
- Kyu-Min Han, "A study on wet texturing for large area crystalline Si solar cells", Master Thesis, Sungkyunkwan University, (2009).
- Jung-Hyun Eum, Kwan-Young Choi, Sahn Nahm and Kyoong Choi, "Texturing of Multi-crystalline Silicon Using Isotropic Etching Solution", J. the Korean Ceramic Society, vol. 46, no. 6, pp.685-688, (2009).
- Dae-Hyun Ju, "Investigation of a new multi-layered anti-reflection coatings and screen printed front electrodes for multi-crystalline Si solar cells", Master Thesis, The University of Ulsan, (2009).
- Kyung-Hae and Jun-Sik Lee, Introduction to Solar Cell Production, Seoul: Dooyangsa-Verlag, pp. 37-77, (2009).
- Jeong-Ho Choi, "Fabrication of the crystalline silicon solar cells using chemical HF treatment for rear surface passivation", Master Thesis, Korea University of Technology and Education, (2012).
- Jong-Woo Yang, "A study of High Efficiency Multi-crystalline Silicon Solar Cells", Master Thesis, The University of Ulsan, (2009).
- Dae-Woo Ihm, Chang-Joon Lee and Sang-Hyuk Sub, "Texturing Multi-crystalline silicon for Solar Cell", Appl. Chem. Eng., vol. 24, no. 1, pp.31-37, (2013).
- Zhenqiang Xi, Deren Yang, Wu Dan, Chen Jun, Xianhang Li and Duanlin Que, "Texturization of Cast Multicrystalline Silicon for Solar Cells", Semicond. Sci. Tech., vol. 19, no. 3, pp. 485-489, (2004).
- K. Tsujino, M. Matsumura and Y. Nishimoto, "Texturization of Multicrystalline Silicon Wafers for Solar Cells By Chemical Treatment Using Metallic Catalyst", Solar Energy Mater. Solar Cells, 90, pp.100-110, (2006).
- PVCDROM, <http://pveducation.org/>.

접수일: 2016년 12월 12일, 심사일: 2016년 12월 21일,  
게재확정일: 2016년 12월 26일