

## 다결정 실리콘 태양전지의 표면 텍스처링 및 반사방지막의 영향

전성욱<sup>a\*</sup>, 임경묵<sup>a</sup>, 최석환<sup>a</sup>, 홍영명<sup>a</sup>, 조경묵<sup>b</sup>

<sup>a</sup>한국생산기술연구원 초정밀 성형가공팀, <sup>b</sup>부산대학교 재료공학과

## Surface Texturing and Anti-Reflection Coating of Multi-crystalline Silicon Solar Cell

Seong-Uk Jun<sup>a\*</sup>, Kyung-Muk Lim<sup>a</sup>, Sock-Hwan Choi<sup>a</sup>,  
 Yung-Myung Hong<sup>a</sup>, Kyung-Mox Cho<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Super Precision Manufacturing Process Team, Busan R&D Center, KITECH

<sup>b</sup>Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University

(Received April 13, 2007 ; accepted June 14, 2007)

### Abstract

The effects of texturing and anti-reflection coating on the reflection properties of multi-crystalline silicon solar cell have been investigated. The chemical solutions of alkaline and acidic etching solutions were used for texturing at the surface of multi-crystalline Si wafer. Experiments were performed with various temperature and time conditions in order to determine the optimized etching condition. Alkaline etching solution was found inadequate to the texturing of multi-crystalline Si due to its high reflectance of about 25%. The reflectance of Si wafer texturing with acidic etching solution showed a very low reflectance about 10%, which was attributed to the formation of homogeneous. Also, deposition of ITO anti-reflection coating reduced the reflectance of multi-crystalline si etched with acidic solution(HF+HNO<sub>3</sub>) to 2.6%.

*Keywords : Multi-crystalline silicon, Solar cell, Anti-reflection coating, Reflectance, Texturing*

## 1. 서 론

에너지, 환경 및 경제문제를 동시에 해결할 수 있는 유력한 대안인 태양전지의 본격적인 보급에는 태양전지의 고효율화에 의한 저가격화가 필수적이다.

태양전지 재료로서 가장 일반적으로 사용되는 결정형 재료 중 단결정 실리콘은 고효율의 구현은 가능하나 높은 제조단가로 인하여 전력생산비용을 낮추는데 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구기관에서 제조단가가 낮은 다결정 태양전지의 연구가 활발히 진행되고 있다. 다결정 실리콘 태양전지는 단결정 실리콘 태양전지보다 변환효율이 떨어지는 단점이 있지만 안정성 및 신뢰도가 높으며, 단결정

태양전지의 70~80%에 달하는 변환효율의 달성이 가능하며 저장치비, 고생산성 등으로 제조비용이 저렴하다<sup>1)</sup>. 태양전지의 효율을 감소시키는 요인에는 태양전지 표면에서의 광학적 손실과 캐리어를 수집하는 전극부분에서의 저항과 캐리어의 재결합에 따른 전기적인 손실이 있다. 이들 중에서도 태양전지 표면에서의 입사광 반사에 의한 광학적 손실이 태양전지의 효율 감소에 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이 광학적 손실을 줄이는 방법으로는 기관 텍스처링과 반사방지막 형성 등이 있다<sup>2)</sup>. 그 중에 텍스처링은 전면의 반사율을 감소시키며, 태양전지 내에서 빛의 통과 길이를 길게 하고, 후면으로부터의 내부반사를 이용하여 흡수된 빛의 양을 증가시킬 수가 있다<sup>3)</sup>. 이와 더불어 텍스처링한 표면 위에 반사방지막을 형성한다면 기관 표면의 반사도는 현저히 줄어들고 한편으로는 태양전지의 단락전류를 향

\*Corresponding author. E-mail : jsu0702@hanmail.net

상시켜 에너지 변환 효율을 증가시킬 수가 있다. 또한 반사방지막의 형성은 상층에서 반사된 태양광과 하층에서 반사된 태양광이 서로 상쇄간섭을 일으키기 때문에 기판 표면에 들어오는 입사광 반사를 줄일 수가 있다<sup>4)</sup>.

다결정 실리콘 기판의 경우에는 태양광에 의해 발생된 전류의 흐름을 방해하는 역할을 하는 결정립계의 존재 때문에, 단결정 실리콘에 비하여 효율이 크게 떨어지며, 효율을 극대화 하는 텍스처링의 효과적인 적용이 필수적이다. 따라서 현재 까지 다결정 실리콘의 표면 텍스처링을 위한 다양한 연구가 진행되어 Alkali, Acidic 용액에 의한 식각, 다공성 실리콘 형성에 의한 식각 등의 화학적 식각방법과 기계적 그루빙(grooving), RIE(reactive ion etching) 의한 건식 식각방법 등이 연구되었다<sup>5)</sup>. 이 중 화학적 습식 식각방법은 제조 공정이 간단하고 장비가 불필요하다는 장점 때문에 건식 식각보다 공정 비용을 크게 절감할 수 있어 저가 고효율을 추구하는 다결정 실리콘 텍스처링에 적합한 방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 가장 널리 알려져 있으나 아직까지 각 공정 조건에 대한 체계적인 연구가 부족한 KOH+IPA 및 HF+HNO<sub>3</sub> 용액을 사용하여 식각 조건에 따른 기판의 표면 형상 및 이에 따른 태양광 특성을 고찰하였다. 또한 반사방지막의 재료에 따라 다결정 실리콘 기판의 태양광 반사특성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 화학 습식 식각법을 이용한 표면 텍스처링

본 실험에 사용된 다결정 실리콘 웨이퍼는 붕소가 도핑된 P형으로 저항 0.5~2.0 Ω이고 두께는 350 μm이며 취급과 측정을 용이하기 위해 2×2 cm<sup>2</sup>의 크기로 절단하여 실험하였다. 기판의 불순물 및 전단 결합 제거를 위해 HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O(1:2:7)을 사용하여 10분간 초음파 세척을 하였다. 텍스처링을 위한 사용된 식각 용액들의 실험 변수는 다음

Table 1. Texturing condition using chemical etching solution

| KOH (g) | IPA (ml)              | H <sub>2</sub> O (ml) | Temp. °C    | Time (min) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------|------------|
| 100     | 100                   | 400                   | 80          | 10~50      |
| 100     | 100                   | 400                   | 50, 80, 100 | 30         |
| HF (ml) | HNO <sub>3</sub> (ml) | H <sub>2</sub> O (ml) | Temp. °C    | Time (sec) |
| 25      | 50                    | 50                    | R.T.        | 10~60      |
| 25      | 30~70                 | 50                    |             | 30         |

표 1과 같다. KOH+IPA 수용액의 농도를 고정시키고 시간과 온도를 달리하여 처리하였고 HF+HNO<sub>3</sub> 수용액은 상온에서 HNO<sub>3</sub>의 농도와 시간을 달리하여 실험을 진행하였다.

### 2.2 반사방지막(Anti-reflection coating)의 증착

실험 2.1을 통하여 도출된 최적 조건에서 텍스처링된 기판 표면위에 SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ITO, DLAR(Double layer anti-reflection coating) 등의 재료를 사용하여 반사방지막을 형성시켰으며 반사방지막의 형성 장비로는 비교적 오염이 적으며 증착 시간 조절이 용이한 Rf-magnetron sputtering와 E-beam evaporator 장치를 사용하여 반사방지막을 증착하였다. 반사방지막 형성을 위한 증착 조건의 설정은 사전 모의 실험을 통하여 조건을 설정하였고 반사방지막에서 가장 중요한 두께의 설정은 반사방지막 재료의 표면에서 반사되는 빛과 실리콘 표면에서 반사되는 빛이 서로 상쇄간섭을 일으키기 위한 조건식으로부터 최적 두께를 설정하였다. 다음 식 (1)은 최저 반사율을 얻기 위해 사용된 반사방지막 최적 두께를 결정하는 식이다<sup>3)</sup>.

$$n \cdot d = \lambda/4 \tag{1}$$

- n: 반사방지막의 굴절률
- d: 반사방지막의 두께
- λ: 입사광선의 파장

### 2.3 태양광 반사율 측정 및 조직 분석

텍스처링 및 반사방지막이 형성된 표면의 구조 형성에 따른 반사율 측정을 위해 UV-vis spectrometer(S-3100)을 사용하여 파장 범위 200~900 nm 범위에서 반사율을 측정하고 식각된 조직의 관찰을 위하여 SEM으로 45° 기울어진 각도에서 표면 관찰 및 분석을 행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Alkali(KOH)를 활용한 식각 조건에 따른 태양광 특성

그림 1은 KOH 수용액을 사용하여 식각온도를 50°C, 80°C, 100°C의 조건으로 30분간 처리한 기판의 반사율 결과이다. 그림 1에서 50°C와 80°C에서 식각 처리한 기판들은 약 25% 내외의 비슷한 반사율을 나타낸 반면 100°C에서 식각 처리한 기판은 약 28%의 높은 반사율을 보였다. 이와 같이 반사율의 차이가 나타나는 것은 alkali 용액을 사용한

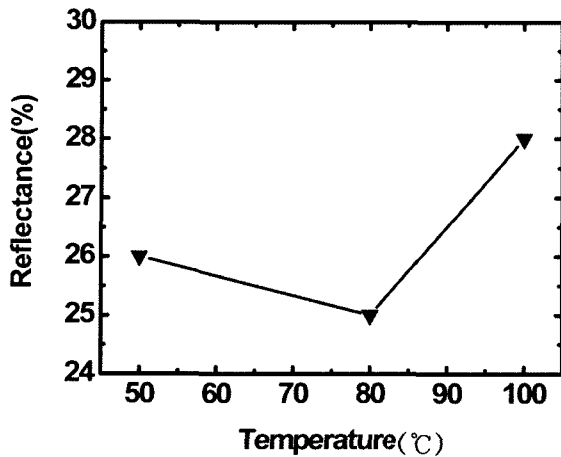


Fig. 1. The variation of reflectance as a function of etching temperature.

화학적 식각법의 근본적인 식각 원리에서 원인을 찾을 수 있다. 실리콘 표면 원자는 공유 결합을 하고 있으며 자체적으로 활성화 되어 있기 때문에 쉽게 OH 이온과 결합하며, 수용액중의 OH 이온은 빠르게 실리콘 표면 원자에 확산 침투하여 표면을 식각한다. 식각속도는 온도와 농도에 의존하며, 높은 식각 온도는 식각반응을 촉진하는 역할을 한다<sup>6)</sup>. 따라서, 100°C 이상의 높은 온도에서는 식각 반응이 빠르게 진행되어 식각 표면이 과식각 되고, 이에 따라 반사율이 높아진 것으로 사료된다. 이에 더하여, 첨가제인 IPA는 끓는점이 84°C이므로 100°C 이상의 온도에서 기화되고, 이로 인해 식각 용액내의 OH의 농도가 높아져 표면의 과식각이 발생 되었다고 판단된다<sup>7)</sup>.

그림 2는 그림 1의 실험결과를 통하여 최적 온도 조건으로 나타난 80°C에서 10분~50분 동안 식각 처리한 기판의 반사율 측정 결과이다. 그림 2에서 알

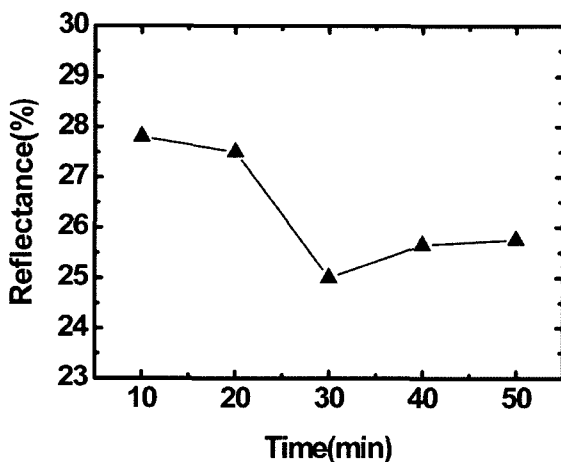


Fig. 2. The variation of reflectance as a function of etching time (as-cut: R-30%).

수 있는 바와 같이 본 실험에서 사용한 as-cut 기판의 반사율은 약 30%이었으며, 10, 20분 처리한 기판의 반사율은 as-cut 기판과 거의 유사한 값을 나타내었다. 이는 수용액내의 OH<sup>-</sup> 이온의 산화 반응이 충분히 진행되지 못하여 기판의 텍스처링을 제대로 형성되지 못하였고, 이에 따라 as-cut 기판의 표면 조직과 유사한 형태의 표면 조직을 유지하고 있었기 때문이다. 또한 30~50분으로 처리한 기판은 거의 유사한 반사율을 나타냈다. 이는 KOH 수용액에서의 첨가제인 IPA의 역할에서 그 원인을 찾을 수 있다. IPA는 KOH에 의해 발생하는 폭발적인 식각반응을 완화시키며, OH<sup>-</sup>가 고체표면으로 급속히 확산되는 것을 적절히 차단하는 screen 효과를 가진다<sup>6)</sup>. 식각 반응이 진행됨에 따라 식각 반응을 일으키는 OH<sup>-</sup>의 농도가 낮아지게 되므로 OH<sup>-</sup>의 농도가 낮아지면, 상대적으로 IPA의 screen 효과가 강화되어 식각 속도가 낮아지기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 이방성 습식 식각법을 다결정 실리콘 기판에 적용한 결과, 80°C의 식각온도 및 30분의 식각시간에서 약 25%의 최저 반사율을 나타내었다. 그러나, 이는 as-cut 기판과 유사한 값으로서, 식각으로서의 의미를 가지지 못하기 때문에 다결정 실리콘 식각에는 적합하지 않다.

단결정 실리콘 기판의 식각에 널리 적용되고 있는 이방성 식각용액이 다결정 실리콘 기판에 적합하지 않은 원인을 살펴보기 위해 에칭 후 실리콘 기판의 표면을 결정방향에 따라 다른 결정립에 따라 관찰하여 보았다. 그림 3에서 식각된 기판의 표면은 결정립의 방향성에 따라 서로 다른 형상을 나타내었으며, 이는 alkali 식각액이 결정립의 방향성에 따라 서로 다른 식각 속도를 가지기 때문이다<sup>7)</sup>. 그림 3(d), (e)에 해당하는 결정립의 경우에는 식각이 원활히 진행되어 반사율을 최소화 할 수 있는 피라미드 형태의 groove를 잘 형성하였으나, (b), (f)와 같은 부분은 오히려 as-cut 기판에 비하여 평탄화된 표면을 나타냈다. groove가 잘 형성된 결정립에 의해 반사율이 저감되더라도, 이러한 평탄화된 결정립 표면은 태양광 반사를 촉진시키게 되고, 결과적으로는 기판 전체의 반사율을 증가시킨 것으로 판단된다. 다결정 실리콘 기판은 필연적으로 alkali 식각액에 의해 식각이 잘 되는 방향성을 가지는 결정립과 그렇지 못한 결정립이 혼재된 형태의 표면 구조를 가지기 때문에, KOH 식각방법으로는 단결정 처럼 균일한 피라미드 구조의 형성이 어렵다고 판단되며, 용액의 저가화 측면에서는 KOH 수용액의 표면 식각은 유리하지만 다결정 실리콘의 식각 공

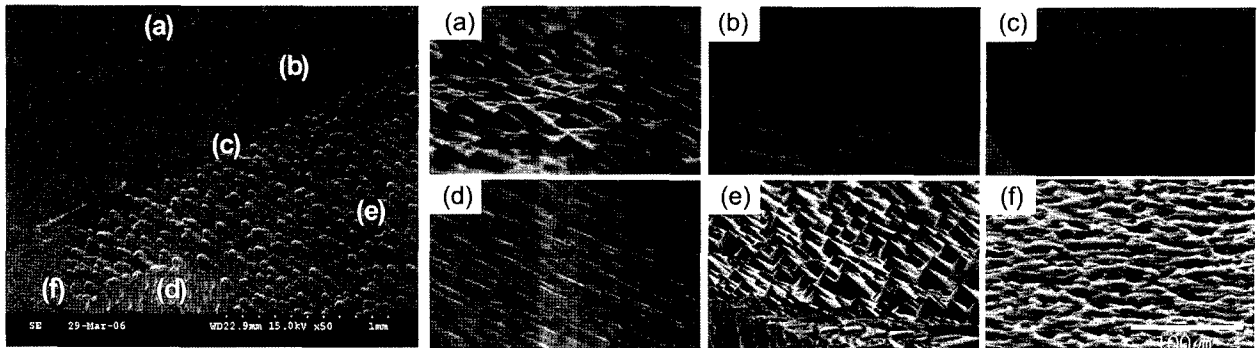


Fig. 3. Surface morphology of Si with variation of crystal orientations.

정에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

**3.2 Acidic(HF)을 활용한 식각 조건에 따른 태양광 특성**

등방성 식각 용액은 결정학적인 방향성에 의존하지 않기 때문에 다결정 실리콘의 식각에 적합할 수 있다. 화학적 식각 반응에서의 식각 속도는 농도, 반응 시간에 따라 변하게 되므로 반응 시간이 길어지게 되면 기판 전체 및 결정 입계의 손상으로 기판이 파손될 우려가 있으므로 적절한 공정 식각 시간을 최적화시킬 필요성이 있다.

그림 4에 산화제가 50 ml로 균일하게 첨가된 HF 수용액을 사용하여 식각한 기판의 반사율을 반응 시간에 따라 측정한 결과이다. 10초부터 30초까지 처리한 기판은 반사율이 계속 감소되다가 30초 이상의 반응 시간부터는 반사율이 높아지는 것을 볼 수가 있다. 식각 시간 10초, 30초, 60초 기판들을 비교해 보면 반사율이 현저한 차이를 보이고 있다. 실리콘의 식각 표면 반응은 산화제인 HNO<sub>3</sub>에서 생성되는 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 이온에 의해 식각 반응이 발생하며, 본격적인 반응이 시작될 때까지 걸리는 시간을 Induction period(유도주기)<sup>8)</sup>라 한다. 본 실험에서 10초의 반

응시간은 Induction period 구간인 것으로 사료되며, Induction period인 10초의 조건에서 식각 처리한 기판에는 아직 미세공의 형성이 되어있지 않아 반사율이 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면, 20~30초의 조건에서 식각 처리한 기판은 충분히 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>와 반응하여 표면에 균질한 미세공들이 충분히 형성되어 반사율이 낮아졌다고 사료된다. 또한 40초에서 60초 처리한 기판의 반사율이 높아진 것은 시간이 지남에 따라 실리콘의 표면이 과도하게 식각되어, 오히려 표면이 평탄화 되었기 때문인 것으로 보인다. 따라서 30초 이상에서의 식각 반응은 시간이 흐를수록 높은 반사율을 가짐을 알 수 있으며 본 실험의 식각 공정 시간 30초일 때 최저 반사율을 보였다.

그림 5는 그림 4에서 도출된 공정 시간을 활용하여 산화제 첨가량에 따른 기판의 반사율 변화를 나타내었다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 산화제의 첨가량에 따라 동일한 식각 시간에서도 반사율의 차이가 나타났다. 그림 5에서 HNO<sub>3</sub>이 30 ml 첨가된 경우에는 수용액 내에서 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>의 농도가 낮아 식각 반응이 충분히 일어나지 않고, 표면의 식각 반응 또한 거의 발생하지 않아 높은 반사율을 나타내

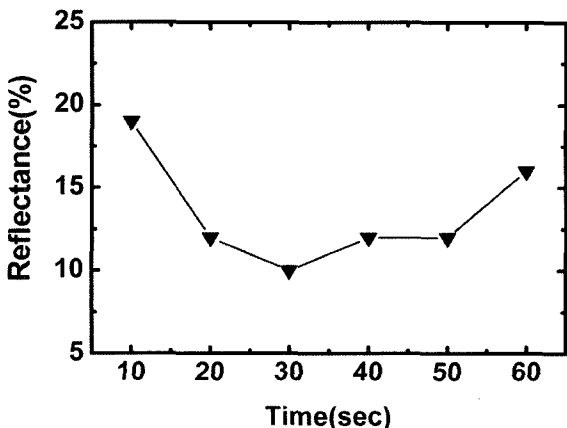


Fig. 4. The variation of reflectance as a function of etching time.

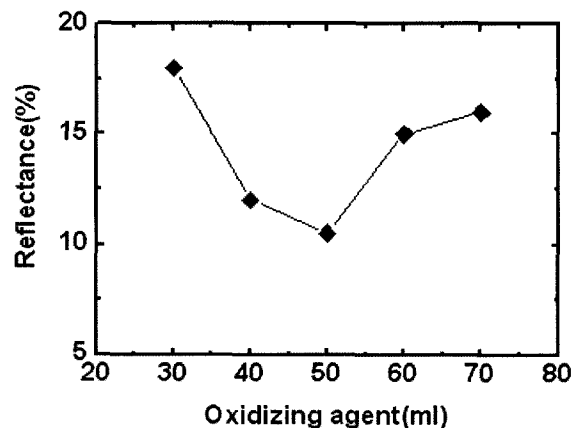


Fig. 5. The variation of reflectance according to the amount of oxidizing agent (HNO<sub>3</sub>).

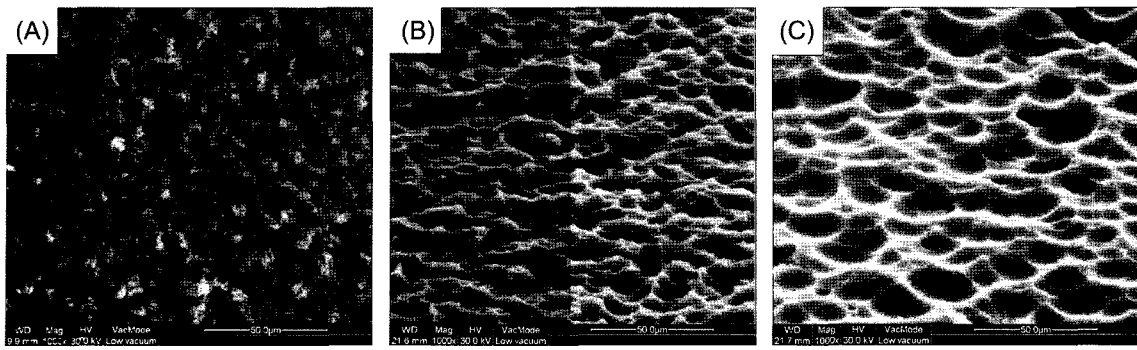


Fig. 6. The surface morphology of multi-crystalline Si wafer for different etching time (A: 10 sec, B: 30 sec, C: 60 sec).

었으며, 그 첨가량이 50 ml까지 증가함에 따라 최적에 가까운 형태 및 크기의 미세공이 형성되어 50 ml의 첨가량 조건에서 가장 낮은 반사율을 나타낸 것으로 보인다. 또한, 50 ml 보다 많은 양이 첨가된 경우에는 HNO<sub>3</sub>의 농도가 많아짐으로 따라 식각 속도가 빨라져 표면 식각 반응이 증가 되어 미세공의 크기가 커지고 폭이 넓어져서 태양광의 반사손실이 많아 반사율이 점점 높아진 것으로 사료된다.

그림 6에서의 SEM 사진들은 공정 식각 시간(10, 30, 60초)에 처리한 기판 표면을 관찰 한 것을 보여주고 있다. 그림 6의 (A)에서 보는 바와 같이 식각 반응 초기에는 as-cut 상태와 비슷한 형태를 지니고 있으며, 가느다란 미세공이 국부적으로 형성되어 있다. 본 실험에 최저 반사율을 가진 (B)의 표면은 미세공들이 비교적 균일하고 조밀하게 형성되었음을 알 수 있다. 이러한 미세공 구조는 태양광이 기판 표면에 입사될 때 다중 반사를 일으킴으로써 빛이 실리콘 표면에 흡수될 기회를 높여, 태양광 반사 손실을 최소화 할 수 있다. 반면에 (c)의 표면에서와 같이 시간이 길어지게 되면 이미 형성된 미세공들이 서로 합쳐져 평탄하고 크기가 큰 미세공으로 형

태가 변화되며, 이에 따라 태양광이 기판 표면에 입사될 때 표면에서의 반사를 증가시키는 것으로 보인다.

그림 7은 앞서 도출된 KOH+IPA 및 HF+HNO<sub>3</sub>의 최적 공정 조건을 이용하여 태양광 파장 650 nm에서 측정한 값이다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이, HF 수용액을 식각에 사용한 경우 as-cut 기판에 비하여 약 20% 정도, KOH 수용액을 사용한 경우에 비하여도 약 15% 이상 반사율이 감소하였다. 이는 HF 수용액을 사용한 화학적 식각법이 다결정 실리콘 태양전지의 텍스처링에 적합한 방법임을 나타낸다.

3.3 반사방지막(anti-reflection coating) 소재에 따른 태양광 특성

반사방지막으로 사용되는 물질을 선택하는 기준은 기본적으로 원하는 파장 영역에서 광투과도가 높고 굴절률이 태양전지에 사용된 물질과 비교하여 반사율이 최소가 되는 값을 가지도록 하는 것이다<sup>3)</sup>. 또한 반사율이 최소화되기 위한 적당한 재료의 굴절률 값과 막의 두께가 최적화되어야 한다. 따라서 본 연구에서 반사방지막으로 쓰인 재료들의 굴절률 값을 조사하여 빛의 상쇄간섭을 일으키기 위한 조건식에 대입하고 각 재료에 대한 반사방지막의 최적 두께를 설정하였다. 표 2는 식 (1)에 의한 반사방지막 재료들의 최적 두께 값을 나타내었다.

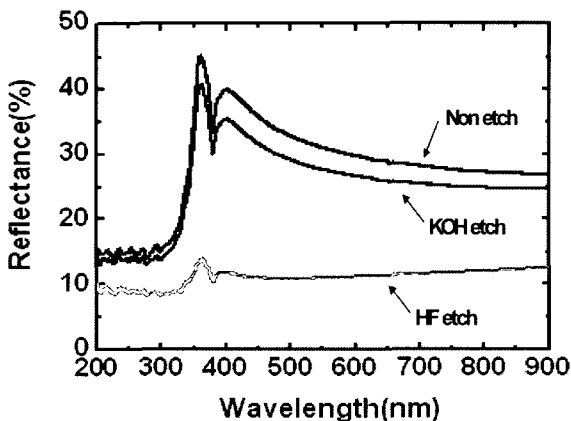


Fig. 7. Reflectance of multi-crystalline Si with different etching solution.

Table 2. The theoretical determination of optimized ARC thickness

| ARC  | Refraction index | Theoretical optimum thickness | Standard wavelength |
|--|------------------|-------------------------------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub>                           | 1.46             | 110 nm                        | 650 nm              |
| TiO <sub>2</sub>                           | 2.3              | 70 nm                         |                     |
| DLAR (SiO <sub>2</sub> +TiO <sub>2</sub> ) | 1.46, 2.3        | S: 110 nm, T: 70 nm           |                     |
| ITO  | 2.0              | 80 nm                         |                     |

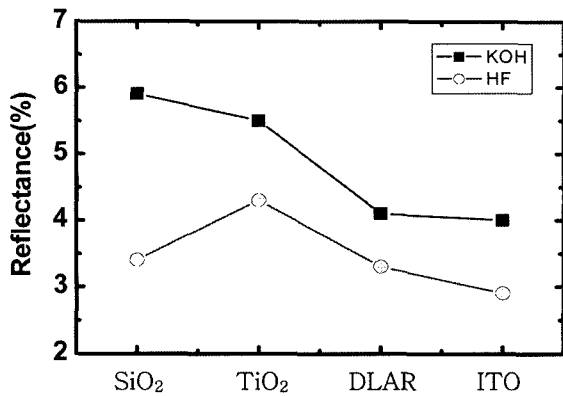


Fig. 8. The reflectance of multi-crystalline Si wafer with various coating materials.

그림 8에서는 앞에서 도출한 공정 조건을 이용하여 표면을 식각 처리한 다결정 실리콘 기판에 다양한 반사방지막을 증착하고 각 재료에 대한 반사방지막의 반사율 결과를 나타내었다.

각 재료들의 반사방지막 최적 두께를 설정하고 반사방지막을 형성한 후에도 반사방지막 소재의 종류에 관계없이 HF+HNO<sub>3</sub> 수용액을 사용한 경우가 KOH+IPA 용액을 사용한 경우보다 반사율이 낮은 결과를 알 수 있다. 본 실험에서는 HF+HNO<sub>3</sub> 용액을 활용한 식각 및 ITO 증착 소재를 적용하여 2.6%의 낮은 반사율을 얻었다. 따라서 본 연구에서 설정한 조건을 적용할 경우에 다소 변환 효율이 상승될 것이라 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다결정 실리콘 표면에 습식 화학법으로 표면 텍스처링 처리를 하고 반사방지막을 형성하여 그 효과를 고찰하였다.

1. KOH 수용액의 공정 조건 80°C, 30분에서의 텍스처링은 기판의 균일 표면 구조 형성이 어려워 최저 반사율이 25% 이상으로 실리콘 표면 텍스처링에는 적합하지가 않음을 확인하였다.

2. HF 수용액으로 식각한 실리콘 표면 구조들은 균일한 미세공들이 형성되어 HF(25 ml)+HNO<sub>3</sub>(50 ml)+H<sub>2</sub>O(50 ml), 30초의 공정 조건에서 반사율 10%를 얻었으며, 이는 다결정 실리콘 표면 텍스처

링에 적합한 방법으로 판단된다.

3. HF 수용액으로 식각 후 ITO 반사방지막을 형성하여 본 실험의 최저 반사율 2.6%의 결과를 얻었다. 따라서 향후 다결정 실리콘 태양전지에 적용한다면 식각 공정의 저가화와 함께 변환 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국 생산기술연구원 내부과제 연구지원 사업에 의해 수행하였습니다.

#### 참고문헌

1. J. H. Park, D. G. Lim, D. Y. Kim, J. K. Ko, C. K. Seo, J. S. Yi, Proceeding of 25th Commemoration, Solar Energy Soc., (2002) 181-182.
2. S. W. Hwang, I. S. Moon, D. S. Kim, S. H. Lee, Proceeding of Foll Meeting, Solar Energy Soc., (2002) 66-73.
3. J. H. Lee, D. G. Lim, J. S. Yi, Principle of Solar Cell, Hong Neung Science, (2005) 280-299.
4. J. H. Kwon, S. H. Hong, Proceeding of Spring Meeting, Solar Energy Soc., (2003) 66-73.
5. S. W. Hwang, H. J. Kim, J. S. Yi, J. Kor. New Renewable Energy Soc., 4 (2005) 209-216.
6. S. H. Shin, M. S. Thesis, Hanyang University, Seoul, (1998) 15-35.
7. N. I. Cho, I. H. Chon, J. Kor. Vaccum Soc., 11 (2002) 253.
8. I. S. Yu, J. H. Sul, J. K. Shin, J. H. Sim, J. H. Lee, J. Kor. Sensor Soc., 4 (1995) 65.
9. K. S. Kim, C. P. Hong, Kor. Inst. Met. Mater., 33 (1995) 701-705.
10. O. J. Kwon, H. Jeung, K. H. Nam, Y. W. Kim, S. C. Bae, S. K. Park, S. Y. Kwon, W. H. Kim, K. W. Kim, J. Kor. Sensor Soc., 8 (1999) 973-978.
11. M. J. Stocks, A. J. Carr, A. W. Blakers, Solar Energy Materials & Solar Cell, 40 (1996) 33-42.
12. E. Vazsonyi, K. De Clercq, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K. Said, J. Poortmans, J. Szlufcik, J. Nijs, Solar Energy Materials & Solar Cell, 57 (1999) 179-188.