

## 광 포획 향상을 위한 다중 아키텍처 식각 기술을 적용한 박막 실리콘 태양전지에 관한 연구

박형기<sup>1</sup> , 이준신<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>아주대학교 AI-초융합 KIURI 질환극복 중개연구단

<sup>2</sup>성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

### A Study on Thin-Film Silicon Solar Cells with Multi-Architecture Etching Technique to Improve Light Trapping

Hyeong Gi Park<sup>1</sup> and Junsin Yi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AI-Superconvergence KIURI Translational Research Center, Ajou University, Suwon 16499, Korea

<sup>2</sup> College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received February 29, 2024; Revised March 13, 2024; Accepted March 13, 2024)

**Abstract:** This work focuses on improving the light-harvesting efficiency of thin-film silicon solar cells through innovative multi-architecture surface modifications. To create a regular optical structure, a lithographic process was performed to form it on a glass substrate through various etching processes, from Etch-1 to Etch-3. AZO was deposited on top of the structures and re-etched to create a multi-architectural surface. These surface-modified structures improved the light absorption and overall performance of the solar cell through changes in optical and physical properties, which we will analyze. In addition, we investigated the effect of post-cleaning on the etched glass structures through EDX analysis to understand the mechanism of the etching action. The results of this study are expected to provide important guidelines for the design and fabrication of solar cells and other photovoltaic devices.

**Keywords:** Thin film solar cells, Light trapping, Glass etching, Aluminum doped zinc oxide (AZO), Surface modification

결정질 실리콘, 마이크로 결정질 실리콘 및 페로브스카이트 등의 흡수층이 빛을 흡수하면 전기로 변환하는 장치를 태양전지라고 한다. 태양전지 혹은 광전 에너지 장치는 실시간으로 에너지를 수확하여 활용하는 측면에서 핵심적인 요소라 할 수 있다. 별도로 에너지를 저장하는 배터리가

필요하지 않고 배터리 충전 및 교체를 해야 하는 번거로움도 사라진다. 이러한 기술은 우리가 살아가는 일상생활에서 사용하는 다양한 종류의 에너지원 중에서 지속 가능하고 무한한 에너지원이기 때문에 이를 변환해 쓸 수 있다는 점에서 앞으로의 4차 산업혁명 시대에서 다양한 센서의 전원으로 활용할 수 있는 기술로 각광받고 있다 [1]. 앞서 언급한 바와 같이 결정질 실리콘을 이용한 태양전지는 산업계에서 많이 쓰이고 있으며 가정용 및 발전용 태양광 모듈로 사용되고 있다 [2]. 하지만 대량 생산으로 저가화 태양전지는 가능할 수 있으나 규격화된 형태로 생산해야 하기 때문에 고객 맞춤형의 태양전지를 생산하는 것은 어렵다.

✉ Hyeong Gi Park; [hgpark007@ajou.ac.kr](mailto:hgpark007@ajou.ac.kr)  
Junsin Yi; [junsin@skku.edu](mailto:junsin@skku.edu)

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.  
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.

고객 맞춤형 및 저가화 태양전지를 만들 수 있는 해결방안은 변환 효율 향상에 있다. 변환 효율 개선은 (1) 전면 그리드 전극, (2) 투명전극, (3) 수소화된 비정질 실리콘, (4) 웨이퍼 준비 등 4가지 요소를 고려하는데 효율 개선의 공통 변수는 전류밀도이다 [3]. 전류밀도는 단위 면적당 전류를 많이 생성하는 것이 중요한데 다시 말하자면 단위 면적당 입사광의 흡수율을 극대화해야 하며 태양전지 설계 최적화, 반사방지막 코팅, 표면 패시베이션 기술 개선과 함께 태양광을 포획할 수 있는 구조가 중요하다고 볼 수 있다 [4].

태양전지 기술의 변환 효율을 극대화하기 위한 연구는 다양한 분야에서 활발히 이루어지고 있으며, 그중에서도 광 포획 기술의 개선은 매우 중요한 연구 분야로 자리잡고 있다. 특히, 식각 구조체는 태양광의 흡수를 극대화하여 변환 효율을 높이는 데 기여할 수 있는 중요한 역할을 하며 빛의 반사를 최소화하고 광 포획을 최대화하여 광전류를 증가시키는 데 도움을 준다 [5-11]. 태양전지 광 포획에서 피라미드 조직을 가진 높은 종횡비의 식각 구조체는 입사광이 구조체 사이를 지나가면서 광학적 결합을 통해 흡수층에 전달하여 광자를 증가할 수 있으며 구체적으로 다양한 식각 기술과 그에 따른 구조체의 형상과 크기가 태양전지의 효율에 미치는 영향을 분석하며, 이를 통해 태양광 포획을 극대화할 수 있는 최적의 구조체 디자인을 제안하고자 한다. 또한, 식각 구조체 상의 다중 아키텍처 구조가 광 흡수율 향상에 기여하는 방식과 그 효과를 규명함으로써, 향후 태양전지 기술의 발전 방향에 중요한 지침을 제공할 것이다. 이번 연구는 태양전지의 상업적 응용 가능성을 넓히고, 궁극적으로는 태양광 활용도를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 이번 연구에서 유리기판 상의 식각 구조체와 관련한 구조 조직 설계, 식각 작용 기전, 식각 용액, 구조체에 증착된 투명 전극을 이용한 다중 아키텍처 구조 표면에 대해 알아보하고자 한다.

비정질 박막 실리콘 태양전지 적용에서 다중 아키텍처 표면을 위한 실험 방법(그림 1)은 초음파 세정, photolithography, 식각, 투명 전도막 증착 및 식각 순서로 진행했으며 내용은 다음과 같다. 우선은 준비한 유리기판은 Corning Eagle XG 기판으로 두께는 7 mm 두께 및 25 mm × 25 mm이며, 초음파 세척기를 준비하여 아세톤, 이소프로필 알코올 및 탈이온수를 각각 400 ml씩 준비하여 순서로 10분씩 세정하였고 질소가스를 이용해 표면에 남은 물기를 제거하였다. Convection oven에 100°C 조건으로 10분간 넣어 둔다. 대기상태에서 기판을 식힌 다음에 yellow room이 갖춰진 시설에서 spin coater에 유리기판을 올려놓고 스포이드를 이용해 HMDS를 올리는데 이에 대한 조건으로

1,000 rpm 5초, 2,000 rpm 40초, 1,000 rpm 5초를 증착하고 이후 hard bake를 150°C에서 3분간 세팅하여 진행한다. 그 다음으로 PR을 1,000 rpm 5초, 5,000 rpm 20초, 1,000 rpm 5초 증착이 완료되면 convection oven에 110°C 10분으로 세팅하여 soft bake를 진행한다. 다음으로 UV photolithography 장치에 mask를 올려놓고 PR이 증착된 기판을 올려놓고 UV를 75초간 노출한다. 단, 노출시간의 조절은 PR 용액의 모델에 따라 다르기 때문에 구매된 제품의 data sheet를 참고해 실험을 진행하면 된다. 노출이 끝났으면 develop 용액에 시료를 천천히 돌려가며 노출된 PR이 떨어지는 것을 관찰하는 데 시간은 약 40초 정도 소요했고 이후 탈이온수에 넣어 잔여 PR을 완전히 제거한다. 시료 뒷면에 남은 물기를 질소가스로 제거하고 잔여 PR은 아세톤을 이용해 제거한다. Convection oven에 140°C 15분간 세팅하여 hard bake를 진행하며 mask 패턴은 3 μm × 3 μm이며 좌측 3은 hole 패턴의 크기, 우측 3은 패턴과 패턴의 spacing을 의미한다. PR 패턴이 잘 준비되었는지 확인하려고 광학현미경을 이용한다. 식각 공정을 진행하는 온도를 유지하고자 항온 장치를 준비하여 증탕법으로 실시하였다. 항온장치의 수조로부터 물이 순환하려면 초자류를 장착하고 내부에 테프론 비이커를 넣어 식각을 한다. 이때 항온장치에 입력한 온도와 실측온도의 확인은 thermo coupler로 확인하는데 25°C를 유지하도록 한다. 식각 용액은 BHF, HF 49% 용액을 탈이온수와 혼합하여 조건에 따라 용액(HF 1%, 5%, 10%)을 만들어서 식각을 진행하였다.

식각한 유리기판의 형상은 FE-SEM을 이용해 확인하였고, 투과도, 반사도 및 안개율을 확인하려면 적분구가 장착된 UV-VIS 장치를 통해 측정하고 분석하였다. 안개율의 계산은 전체 투과도에서 확산 투과율을 나눠 계산하여 안개율을 확인할 수 있다. 식각 공정을 마친 시료는 재차 post cleaning 과정을 진행하였고 EDX를 이용해 검증하였다.

AZO 증착은 RF magnetron sputtering을 이용했는데 ZnO 98%에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%가 도핑된 6인치 타겟으로 기판 플레이트와 타겟이 평행하게 마주 보는 형태로 둘 간의 거리는 13 cm, 기판온도 200°C, 기본 진공은 2×10<sup>-6</sup> Torr, Ar 20 sccm를 mass flow meter (MFC)를 통해 2 mTorr 작동압력을 needle valve로 조절하고 유지한다. 기판의 회전속도는 5 rpm, power density는 1.097 W/cm<sup>2</sup>으로 약 200 W 전력을 가한다. 증착 두께는 1 μm, 면저항 및 전기적 특성은 각각 4-point probe, hall-effect measurement system (Ecopia HMS-300), 광학적 특성(투과도 및 안개율)은 UV-VIS 분광 광도계로 측정하여 분석하였다.

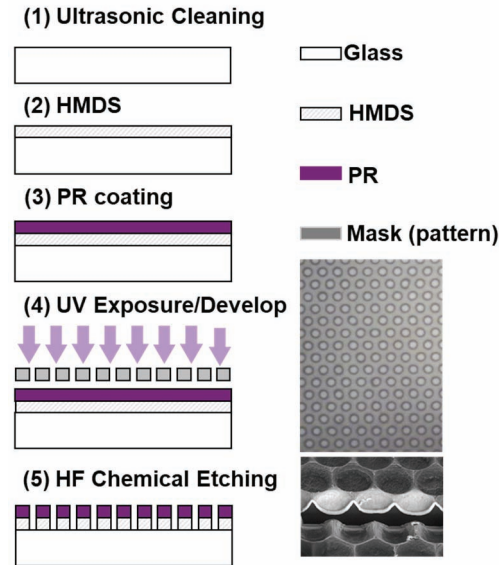


Fig. 1. Schematic of lithography process for honeycomb periodic structure on the glass substrate.

그림 2(a)는 유리기판을 식각 했을 때 패턴 간격에 따라 예상하는 세 종류 구조의 모습 및 광학적 투과도에 대해 FDTD (finite-difference time-domain) 시뮬레이션으로 진행하였다. 각 구조별로 높이는  $0.5\ \mu\text{m}$ ,  $1.5\ \mu\text{m}$ ,  $1\ \mu\text{m}$ 로 고정했으며 Etch-1 구조는 패턴 간격에 관계없이 약 91%의 투과도를 나타냈고 Etch-3 구조  $6\ \mu\text{m}$  간격에서 93.3%의 광학적 투과도를 관찰하였다. 반면에 Etch-2는  $2\ \mu\text{m}$  간격에서 80%의 낮은 광학적 투과도를 나타냈으며 다른 간격에서도 마찬가지로 bare glass의 92%보다 낮은 것을 알 수 있다. Etch-2 구조의 투과도는 높을 것으로 예상했으나 물리적, 광학적 상호작용에 의한 것으로 낮아졌는데 이는 빛의 파장 영역에 따라 구조에 의해 간섭효과를 유발하여 Etch-2 구조의  $2\ \mu\text{m}$  간격을 가진 시료에서는 단파장 영역의 빛이 구조체와 상호작용을 통해 간섭을 일으켜 투과도가 감소하나, Etch-3 구조  $6\ \mu\text{m}$  간격은 특정 모드의 결합에 의한 공진으로 인해 적은 흡수 및 산란으로 더 높은 투과도로 이어진 것으로 분석된다 [12].

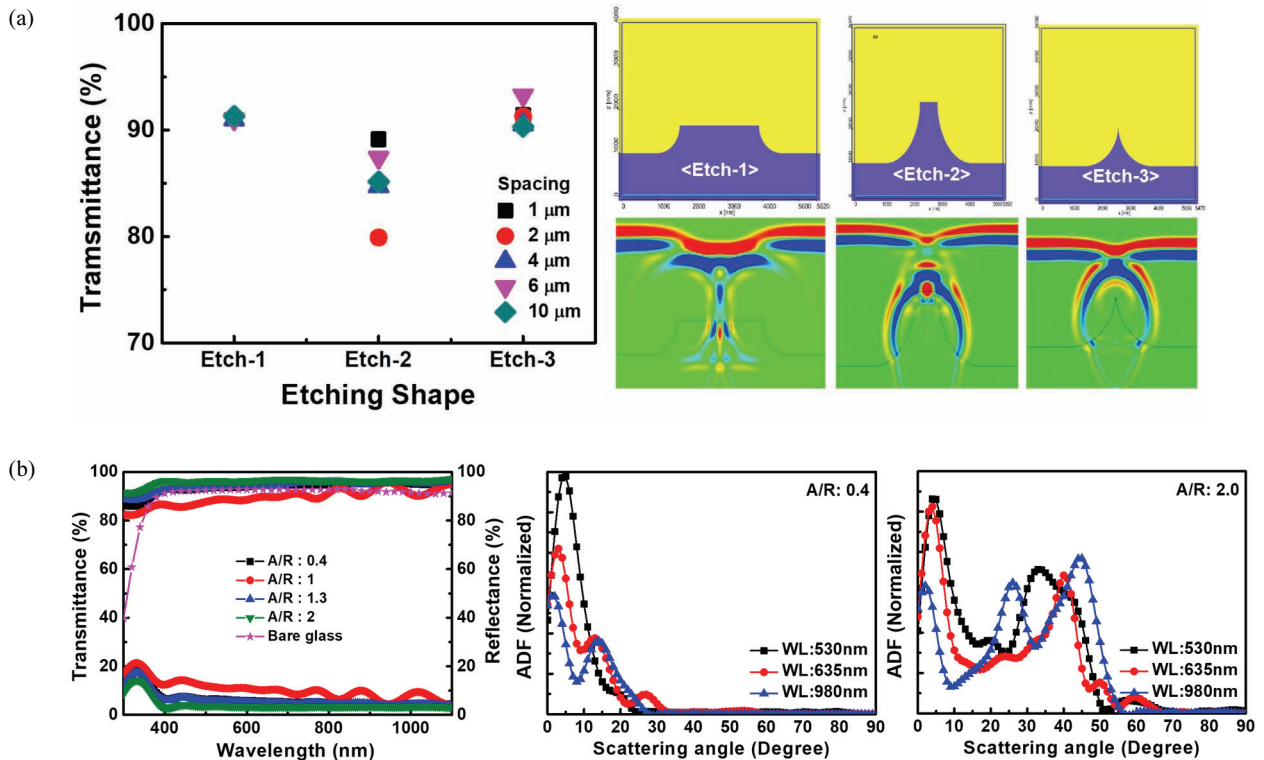


Fig. 2. Finite-difference time-domain (FDTD) simulation for etching structures in thin film silicon solar cells: (a) optical transmittance as a function of the spacing and different structures and (b) optical transmittance and reflectance as a function of aspect ratio (A/R) and angular distributed function (ADF) at different A/R values of 0.4, and 2, respectively.

그림 2(b)는 유리기판 위에 형성된 다양한 종횡비를 가진 마이크로 구조체들이 광학적 특성, 특히 산란 각도 변화에 미치는 영향을 FDTD 시뮬레이션을 통해 조사하였다. 구조체의 종횡비는 0.4, 1, 1.3, 2로 변화시키면서 400~1,100 nm 파장 범위에서 광학적 투과도 및 반사도를 진행하였다. 분석한 결과, 구조체의 종횡비가 증가함에 따라 광학적 투과도는 상당히 증가하는 관찰할 수 있다. 특히, 종횡비가 2일 때는 평균 투과도가 96.42%에 이르러 종횡비가 1인 경우의 89.56%와 비교하여 상당한 개선을 보였다. 이는 높은 종횡비가 구조체를 통과하는 빛의 경로를 최적화하여 광학적 손실을 줄이고, 효율적인 광 포획을 촉진한다는 것을 의미한다. 또한 산란 각도에 관한 분석에서는 종횡비의 변화가 구조체와 상호 작용하는 빛의 산란 특성에 중대한 영향을 미치는 것을 확인했는데 구체적으로 종횡비 2의 경우에는 530 nm, 635 nm, 980 nm 파장에서 산란 각도의 peak이 종횡비가 0.4인 경우보다 더 좋은 각도로 이동하는 것을 관찰하였다. 이러한 peak의 이동은 구조체의 기하학적 형태가 빛의 산란 방향을 변화시키고 이는 다시 빛의 전파 및 분포에 영향을 미친다는 것을 의미한다 [13]. 그림 2를 통해 Etch-3의 6 μm 간격 및 종횡비 2인 구조체에서 높은 투과도 및 낮은 반사도를 얻을 것으로 예상된다.

유리기판을 hexamethyldisilazane (HMDS)와 포토 레지스트(PR)로 패터닝 후, 다양한 화학적 식각 공정 용액 (BHF, HF 1%, HF 5%, HF 10%)의 영향에 대해 그림 3에 나타났다. 다양한 화학적 식각 용액을 사용하여 식각한 후, 이들의 광학적 특성인 투과도 및 안개울을 측정하였다. 식각 공정에 따라 구분된 Etch-1에서 Etch-3 구조체에 대한 실험 결과, BHF 및 HF 10% 용액에서 식각된 Etch-3 구조체는 각각 95.2%, 96.4%의 높은 투과도를 나타내었다. 이는 해당 용액들이 유리기판 표면을 매끄럽게 식각하여 빛의 투과를 최적화하는 것으로 해석될 수 있다. 또한, 이러한 높은 투과도에도 불구하고, 안개울은 각각 55.4%, 63.9%로 상대적으로 높게 관찰되었다. 식각 과정은 표면의 미세 구조를 생성하는 데 산란을 증가시키지만, 동시에 투명도를 유지하는 데 충분히 효과적임을 알 수 있다. 반면, HF 1%, HF 5% 용액에서 식각된 Etch-1 구조에서 투과도는 약 93%로 관찰되며 안개울은 HF 1%에서 52.3%, HF 5%에서 43.1%로 측정되었다. 이 결과는 더 낮은 농도의 HF 용액이 유리기판을 덜 공격적으로 식각하여 더 낮은 투과도와 안개울을 초래한다는 것을 의미한다. 이번 실험을 통해 유리기판의 화학적 식각 공정이 광학적 성능, 특히 투과도와 안개울에 미치는 중요한 영향을 보여주는데 높은 투과도와 적절한 안개울을 동시에 달성하려면 HF

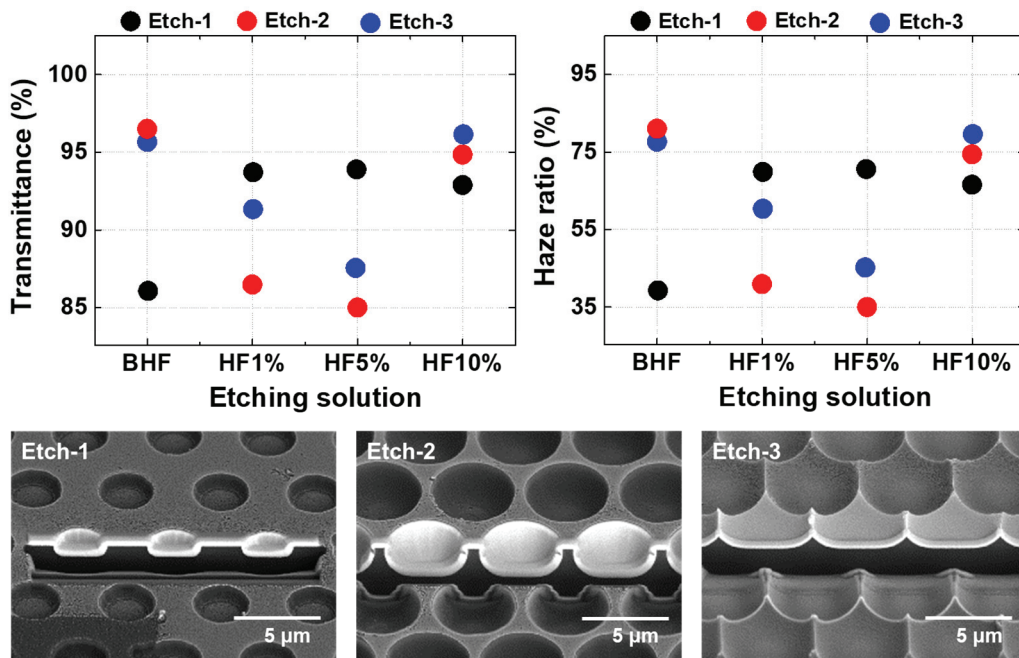


Fig. 3. Transmittance and haze ratio at different chemical etching solution (BHF, HF 1%, HF 5%, HF 10%) (the below images have performed by FE-SEM for glass etching).

10%의 식각 용액을 선택하는 것이 공정 조건 최적화에 필수적인 것을 알 수 있었다.

유리기판 표면에 부산물(By-product) 후속 처리(post-treatment)는 식각 이후에 표면에 남아 있는 다양한 부산물을 제거하는 효과 때문에 필요한 과정이다. 이에 대한 검증을 위해 참조 시료를 포함해 식각 직후(as-etch) 및 다양한 후속 처리를 거친 시료를 energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)를 이용하여 분석하였다 (그림 4). 참조 시료(reference sample)와 비교하여 식각 직후 시료에서 산소(O) 66.65%, 규소(Si) 23.6%, 알루미늄(Al) 6.62%, 칼슘(Ca) 3.13%의 비율 변화가 관찰되었는데 식각 직후의

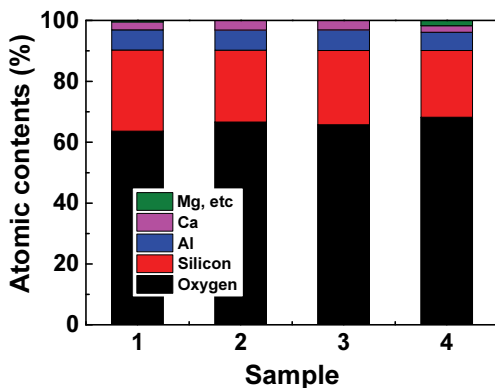


Fig. 4. The atomic contents under various sample conditions of wet chemical glass etching (sample #1: reference, #2: as-etch, #3: standard cleaning after etched glass, #4: RCA cleaning after etched glass).

시료에서 산소의 비율이 증가하고 규소의 비율은 감소하는 경향을 보였다. 유리기판 표면에서 규소가 제거되며 산소에 노출하는 현상으로 보이며 알루미늄과 칼슘의 비율에도 미세한 변화로 식각 과정에 발생하는 표면 변화와 관련이 있을 수 있다. 식각 직후의 부산물 처리 효과를 평가하고자 두 가지의 다른 세정 방법을 적용하였다. 첫 번째는 일반적으로 알려진 유리기판을 세정하는 절차로, 아세톤 및 이소프로필 알코올(IPA)을 사용한 세정이다 [14]. 이 방법은 주로 유기 오염물을 제거하는데 사용되는데 EDX 분석 결과, 식각 직후의 샘플과 비교했을 때 유의미한 조성 변화가 관찰되지 않았다. 이는 아세톤과 IPA 세정이 주로 유기물 제거에 효과적이지만, 유리기판의 무기 부산물 제거에는 제한적일 수 있음을 나타낸다. 두 번째 방법으로 RCA 세정 기법을 적용하였다 [9]. RCA 세정은 유기 오염물 제거와 함께 금속 이온 및 기타 무기 오염물을 제거하는데 효과적인 방법으로 알려져 있으며 RCA 세정 후의 샘플은 EDX 분석을 통해 산소 68.2% 비율의 증가와 규소 21.91%, 칼슘 2.19% 및 알루미늄 6%로 감소를 나타냈다. 이러한 결과는 RCA 세정이 식각 공정 중에 형성된 무기 부산물을 효과적으로 제거하며, 유리기판 표면의 청정도를 개선하는데 기여할 수 있음을 시사한다.

따라서 식각 후 남은 부산물의 종류와 양에 따라 적절한 세정 방법의 선택이 중요하며, 아세톤과 IPA 세정은 주로 유기 오염물 제거에 적합하며, RCA 세정은 유기물 외에 무기 오염물 제거에도 효과적임을 입증한 것으로 유리기판의 광전 장치의 제조 과정에서 표면 처리 및 세정 프로토콜 최적화에 중요한 정보를 제공하며 구조체 식각 공정을 통

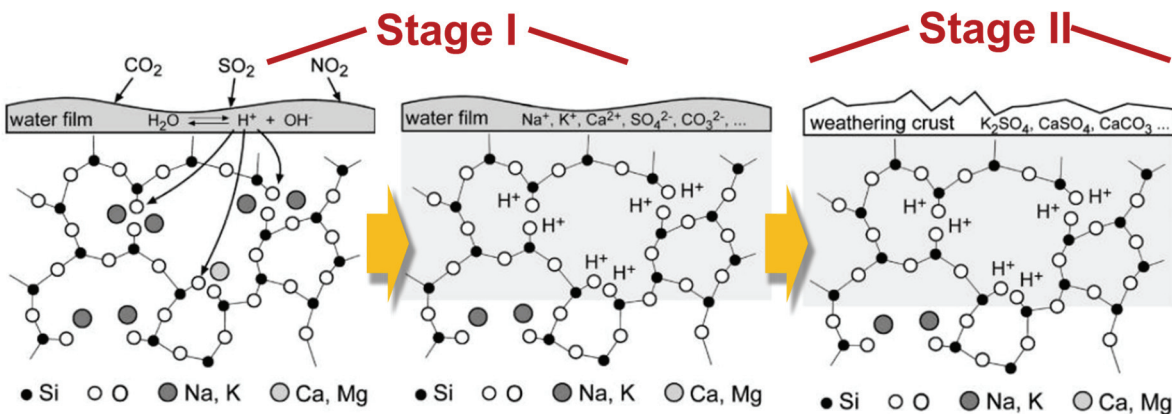
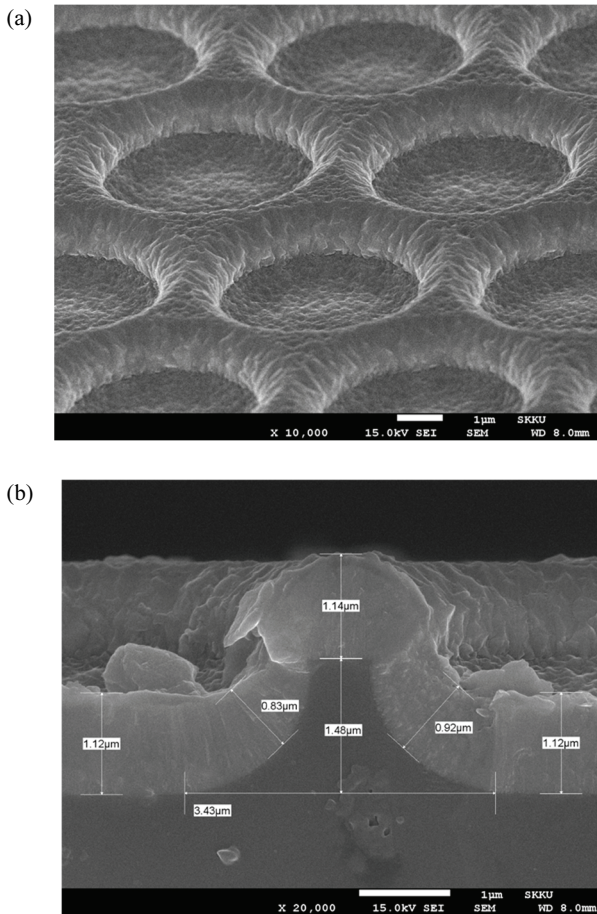


Fig. 5. The schematic of glass etching mechanism by HF solution [Stage I depicts the initial interaction of the glass surface with mobile ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and their exchange with  $\text{H}^+/\text{H}_3\text{O}^+$  ions due to humidity, leading to the formation of a silica-rich surface layer. This is characterized by the increase in hydroxyl ( $\text{OH}^-$ ) ions and the initial stage of glass network alteration. Stage II shows the continued reactions due to water condensation, which leads to further dissolution of the silica network at higher pH levels. This stage is marked by the formation of both soluble and insoluble precipitates, resulting in the staining and corrosion of the glass surface] [15].

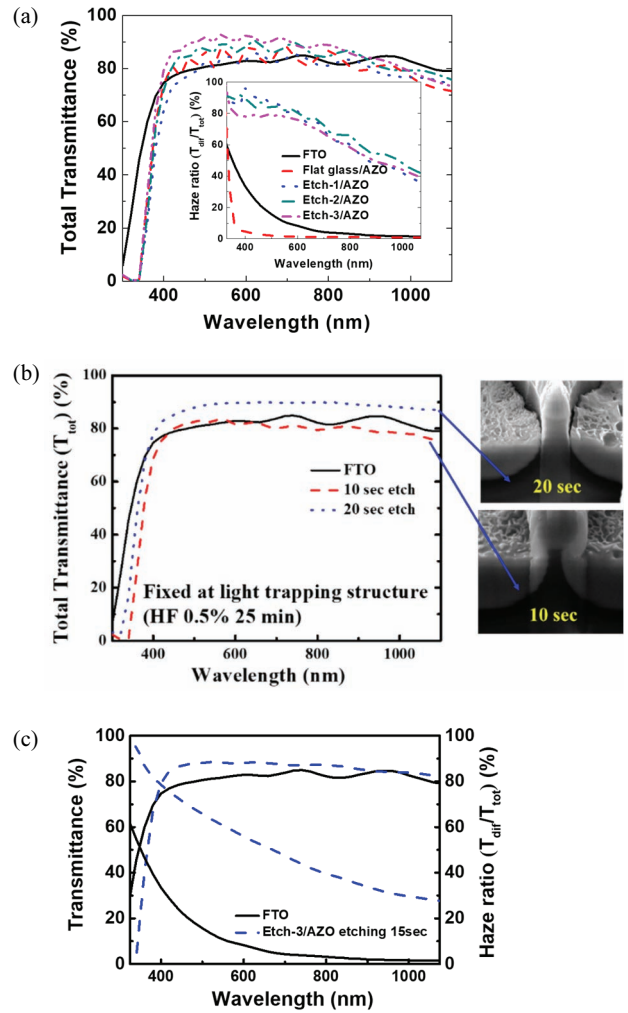
해 유리기판에 부산물 후처리 효과는 유리기판 식각 과정의 작용 기전(mechanism)은 유리의 이온 교환(용출) 과정으로 유추할 수 있다(그림 5) [15]. 1단계에서 유리 표면에 이동성을 가진 알칼리 및 알칼리 토금속 양이온들이  $H^+/H_3O^+$  (즉 수소 이온 또는 삼산화수소 이온)과 교환되는 현상을 나타내는데 교환 과정에서 실리카가 풍부한 표면층의 형성으로 이어진다. 2단계에서 pH가 상승하고 액체와 용해 가능한 침전물이 형성되는데 pH가 9 이상으로 상승하면 실리카가 풍부한 glass network가 용해되어 표면이 저하되고 불용성 침전물이 형성되는 과정을 통해 식각이 된다. 유리기판의 식각 작용 기전은 이온 교환 과정을 통해 발생한 유리 구조체의 부산물은 후속 처리 공정을 통해 제거할 수 있다는 점을 그림 4, 5를 통해 알 수 있었다.

대표적인 Etch-2 유리 구조체의 AZO 박막을 direct current (DC) magnetron sputter를 통해 증착하여 그림

6과 같이 나타냈는데 목표 두께는  $1\ \mu m$ 이며 이들 5곳의 평균은  $1.03\ \mu m$ 로 3% 내의 오차범위에서 균일하게 증착된 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 각 구조체에 증착된 AZO 박막의 투과도 및 안개율을 UV-VIS spectrophotometer를 통해 측정하였고 Etch-3/AZO 구조체가 400~1,100 nm 파장 영역에서의 평균 투과도가 85.79%로 다른 시료와 비교해서 월등한 투과율을 보인다 [그림 7(a)] (FTO: 81.83%, Flat glass/AZO: 81.16%, Etch-1/AZO: 79.88%, Etch-2/AZO: 83.92%). 비록 안



**Fig. 6.** (a) Top-view FE-SEM image of AZO deposition on the structure of Etch-2 (magnification  $\times 10,000$ ) and (b) cross-sectional FE-SEM of the same structure (magnification  $\times 10,000$ ).



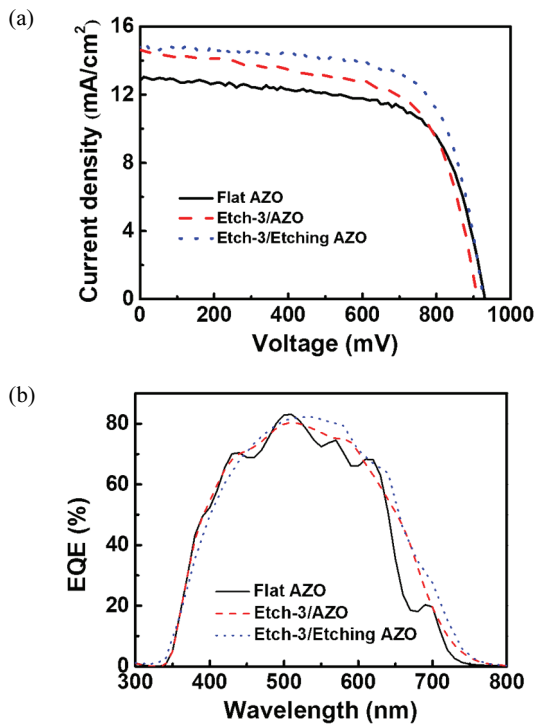
**Fig. 7.** (a) Spectral analysis showing the photonic response of patterned structures over time, with distinct peaks illustrating changes in material properties, (b) time-lapse SEM images illustrating the morphological evolution of etched surfaces at 10 seconds and 20 seconds, highlighting the dynamic etching process, and (c) transmittance and haze ratio spectra for FTO and Etch-3/AZO etched for 15 seconds, demonstrating the optical properties and efficiency of the etched layers.

개울은 Etch-2에서 66.72%로 높게 나오지만 투과율이 Etch-3보다 낮기 때문에 우리는 Etch-3를 이용해 비정질 실리콘 박막 태양전지를 만들고자 한다. 박막 태양전지를 제작하기에 앞서 구조체 상에 AZO 박막을 별도로 처리해야 한다. 그 이유는 입사광이 구조체의 크기에 따라 산란된 빛이 특징적인 파장에서 광을 포획하여 전체적인 파장에서의 광 효율을 극대화할 수 있어 AZO 박막을 HCl 0.5%로 처리하는 것이다 [16]. Etch-2상에 AZO 박막을 HCl 0.5%를 이용해 처리하기 위해 시료를 20초 동안 침지하여 꺼내서 관찰하면 측면 부분의 AZO 박막이 끊어져 면저항 값이 급격히 증가하기 때문에 향후 실리콘 박막 태양전지로 역할을 할 수 없다. 10초가량을 침지할 경우, 측면이 그대로 살아 있음을 FE-SEM으로 확인했으며 이에 10초와 20초 사이의 중간인 15초로 고정하고 AZO 표면 처리를 진행하였다. 이처럼 진행된 결과를 통해 FTO와 비교할 경우 전반적으로 투과도, 반사도, 흡수, 안개울 및 면저항 값이 우수한 것을 그림 7(c)를 통해 확인할 수 있다.

그림 8은 Flat AZO 기판, Etch-3/AZO 및 Etch-3/Etching AZO 기판 샘플을 각각 준비하여 비정질 박막 태양전지로 제작하였고 이에 대해 비교한 것을 제시한 것

이다. 광을 조사한 상태에서 측정된 전류-전압의 결과에서 Etch-3/Etching AZO 시료에서 변환 효율이 9.45%로 Flat AZO의 효율인 8.71%보다 약 0.6%가 증가하였는데 개방전압(Flat AZO: 950 mV → 925 mV)이 약간 감소했음에도 불구하고 전류밀도 증가(Flat AZO: 12.8 mA/cm<sup>2</sup> → 14.8 mA/cm<sup>2</sup>)가 효율 개선에 영향을 준 것으로 분석할 수 있다. 이는 외부 양자 효율 그래프를 통해 알 수 있는데 Flat AZO 시료와 비교하면 중간 및 장파장 범위(550~800 nm)에서 확연하게 변화가 있으며 적분하여 양자 효율의 전류밀도를 계산하면 1.4 mA/cm<sup>2</sup>가 증가한 것을 알 수 있다 [17].

이번 연구는 박막 실리콘 태양전지의 광 포획 향상을 위한 다중 표면 아키텍처 표면의 연구에 중점을 두었다. 다양한 식각 용액과 공정을 통해 유리기판 위에 형성된 구조체의 광학적 및 물리적 특성 변화를 조사하였고 식각 후 남은 부산물의 제거 및 후처리 과정이 구조체의 투과도 및 안개울에 미치는 영향을 분석하였다. 식각 공정의 최적화 및 후처리 방법의 개선을 통해 태양전지의 광흡수율과 전체적인 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 연구 결과를 통해 향후 고객 맞춤형 저가화 태양전지 및 기타 광전 장치의 설계 및 제조에 중요한 지침을 제공할 것으로 기대된다.



**Fig. 8.** (a) Current-voltage (I-V) curves and (b) external quantum efficiency (EQE) of different samples such as Flat AZO, Etch-3/AZO, and Etch-3/Etching of AZO.

## 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 혁신성장 선도 고급연구인재 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.NRF2021M3H1A104892211).

## ORCID

Hyeong Gi Park  
Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-9590-1623>  
<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

## REFERENCES

- [1] P. C. Madara, H. Yousuf, M. A. Zahid, S. K. Dhungel, Y. Kim, and J. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 154 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.2.5>
- [2] H. G. Park, D. Y. Kim, and J. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 133 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.2.2>
- [3] M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura,

- T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, *IEEE J. Photovoltaics*, **4**, 96 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282737>
- [4] R. Saive, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, **29**, 1125 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3440>
- [5] C. Battaglia, C. M. Hsu, K. Söderström, J. Escarré, F. J. Haug, M. Charrière, M. Boccard, M. Despeisse, D.T.L. Alexander, M. Cantoni, Y. Cui, and C. Ballif, *ACS Nano*, **6**, 2790 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1021/nn300287j>
- [6] F. Qiao, Y. Xie, G. He, H. Chu, W. Liu, and Z. Chen, *Nanoscale*, **12**, 1269 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C9NR08761C>
- [7] E. Garnett and P. Yang, *Nano Lett.*, **10**, 1082 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1021/nl100161z>
- [8] A. Tooghi, D. Fathi, and M. Eskandari, *Sci. Rep.*, **10**, 18699 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75630-4>
- [9] H. G. Park, M. Shin, Y. K. Kim, J. H. Lee, M. Ju, and J. Yi, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **24**, 579 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-023-00479-z>
- [10] S. Ahn, H. Park, J. Cho, C. Park, J. Park, H. Lee, K. Hong, S. Bong, and J. Yi, *Optik*, **229**, 166304 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166304>
- [11] I. Massiot, A. Cattoni, and S. Collin, *Nat. Energy*, **5**, 959 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00714-4>
- [12] Z. Xuan, J. Li, Q. Liu, F. Yi, S. Wang, and W. Lu, *The Innovation*, **2**, 100081 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100081>
- [13] X. Fan, W. Zheng, and D. J. Singh, *Light: Sci. Appl.*, **3**, e179 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.60>
- [14] S. M. Sattari-Esfahlan, H. G. Kim, S. H. Hyun, J. H. Choi, H. S. Hwang, E. T. Kim, H. G. Park, and J. H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 7274 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c18706>
- [15] M. Melcher, R. Wiesinger, and M. Schreiner, *Acc. Chem. Res.*, **43**, 916 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1021/ar9002009>
- [16] H. Park and D. Kim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 80 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00263-3>
- [17] H. Park, M. H. Shin, S. M. Iftiqar, S. Q. Hussain, M. Ju, Y. Kim, E. C. Cho, and J. Yi, *Opt. Commun.*, **467**, 125657 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125657>