

고성능 박막태양전지를 위한 유리 기판 및 산화 아연 투명 전극의 2중 구조 표면 조직화 공정 연구

Double Texturing of Glass Substrate and ZnO : Al Transparent Electrode Surfaces for High Performance Thin Film Solar Cells

강 동 원*
(Dong-Won Kang)

Abstract - We studied surface texture-etching of glass substrate by using reactive ion etching process with various working pressure (0.7~9.0 mT). With the increase in the pressure, a haze parameter, which means diffusive transmittance/total transmittance, was increased in overall wavelength regions, as measured by spectrophotometer. Also, atomic force microscopy (AFM) study also showed that the surface topography transformed from V-shaped, keen surface to U-shaped, flattened surface, which is beneficial for nanocrystalline silicon semiconductor growth with suppressing defective crack formation. The texture-etched ZnO:Al combined with textured glass exhibited pronounced haze properties that showed 60~90 % in overall spectral wavelength regions. This promising optical properties of double textured, transparent conducting substrate can be widely applied in silicon thin film photovoltaics and other optoelectronic devices.

Key Words : Solar energy, Thin film solar cell, Glass substrate, Reactive ion etching, Al-doped ZnO

1. 서 론

태양전지는 신재생에너지 분야에서 전력변환효율성이 우수한 소자로 평가받고 있다. 그 중에서 실리콘 박막 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지에 대비하여 재료 소비를 저감시키면서도 대면적화 하여 모듈을 제작할 수 있기 때문에 주목받고 있는 기술이다. 또한 적층구조로 제작하게 되면 전력변환효율을 더욱 끌어올릴 수 있기 때문에 확장성 측면에서도 용이한 기술이다[1-5]. 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon; a-Si:H)은 흡수계수가 높아 단파장 빛을 흡수하는 데에 효율적이지만, 특유의 광열화 현상은 아직도 미제로 남아 있다. 반면 미세결정 실리콘(hydrogenated nanocrystalline silicon; nc-Si:H) 계열의 광흡수 소재는 광안정성 측면에서도 유리하기 때문에 실리콘 박막에서 매우 필수적인 소재이다 [6,7]. 반면 미세결정 실리콘은 비정질 대비하여 광흡수 계수가 낮기 때문에, 박막의 두께가 비정질 대비 두꺼워야 하며 통상적으로 1-3 μm 수준에 이르고 있다. 이는 비정질 대비하여 5배 이상 두꺼운 수준이며, 이 두께를 최대한 낮춰서 증착 시간을 줄이기 위해서는 입사광의 효율적인 이용이 매우 중요하다고 할 수 있다. 태양전지로 입사하는 태양광을 최대한 산란시켜서 광 경로 길이(optical path length)를 증가시키면, 상대적으로 얇은 두께로도 높은 광전류를 확보할 수 있게

된다. 이 입사광의 산란을 발생시키는 기술로는 표면의 조직화(surface texturing) 기술이 가장 대표적인데, 최근에는 알루미늄 도핑된 산화아연(Al-doped ZnO; ZnO:Al)을 투명 전극으로 사용하면서 표면 조직화 과정을 통해서 광 산란 기술을 구현해 온 바 있다[8,9]. 또한 투명전극과 P형 실리콘 사이에서 반사방지막으로도 기능하는 역할을 한다.

본 연구에서는 표면 조직화 처리된 ZnO:Al를 이용하는 것 이외에, 하부의 유리 기판을 추가적으로 표면 조직화를 진행하여 전체적인 광 산란도를 더욱 극대화하는 것을 목표로 한다. 유리 기판의 표면 조직화 공정은 다양한 방식으로 진행할 수 있는데, 유리 기판이 결정성을 띄지 않아서 습식 식각 공정으로는 비등방성 식각을 진행하기 어려운 측면이 있다. 따라서 건식 식각 방법을 고려하게 되는데, 주기적으로 피라미드 형태를 갖는 표면 패턴이 광 산란도의 향상에 유리한 것으로 알려져 있다는 점을 고려하면 특정 패턴을 갖도록 유리 기판을 식각하는 것이 필요할 수 있다. 그러나, 피라미드 형태를 갖도록 식각하기 위해서는 추가적인 마스크(mask) 같은 유사 패터닝 (patterning) 기술을 도입해야 할 것이며, 이는 공정 시간과 비용의 증가로 이어지는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 희생 층(sacrificial layer)이나 mask의 이용 없이 건식 식각을 바로 진행하는 공정을 시도 및 최적화한다. 공정 장비로 활성 이온 식각(reactive ion etching) 장비를 이용하며, 핵심 공정 파라미터인 공정 압력을 변화시켜 가면서 유리 기판의 식각하고 광학적 산란도와 표면 특성을 체계적으로 분석하여 최적의 표면 조직화된 유리 기판을 확보한다. 그 후에

* Dept. of Solar & Energy Engineering, Cheongju University, Korea.

E-mail: kang@cju.ac.kr

Received : May 24, 2017; Accepted : July 11, 2017

상기의 투명전극인 ZnO:Al 박막을 증착한 후, 투명전극이 코팅된 기판 상태의 광학적 특성을 평가하여 태양전지로 응용 시에의 효율성을 평가하도록 한다. 결론적으로 본 연구에서 발표하는 실험 과정들을 통해 압력 변화에 따른 식각 공정의 최적화를 통하여 매우 우수한 광 산란도를 갖는 투명 전극/유리 기판 구조를 얻었으며 향후 태양전지의 다각도에 매우 높은 활용도를 보일 것으로 기대된다.

2. 실험 과정

희생 층이 없이 유리 기판의 비등방성 식각을 위해서 활성 이온 식각 장치가 이용되었다. 이 장비는 유도결합 플라즈마 (inductively coupled plasma) 방식을 이용하며 CF₄ 가스와 Ar 가스를 혼합하여 플라즈마를 형성 및 유리 기판을 식각하도록 구성하였다. CF₄ 가스는 화학 반응을 통해 식각을 진행하게 되며, Ar 가스는 비휘발성의 부산물이 생성되는 과정에서 물리적으로 식각을 해내면서 화학적 식각 프로세스가 계속 진행될 수 있도록 한다. 적절한 화학적 식각과 물리적 식각의 메커니즘을 위해서 적정 가스 비율인 CF₄ : Ar = 9 : 1을 설정하였다 (가스 flow rate 는 CF₄ : Ar = 18 sccm : 2 sccm) . 플라즈마를 위한 인가 전력은 500 W로 설정하였고 기판 바이어스는 설정하지 않은 상태에서, 공정 압력을 0.7~9.0 mT로 다양하게 변화시켜 가면서 공정을 진행하였으며 공정 시간은 약 20~40분 가량 진행하였다. 유리 기

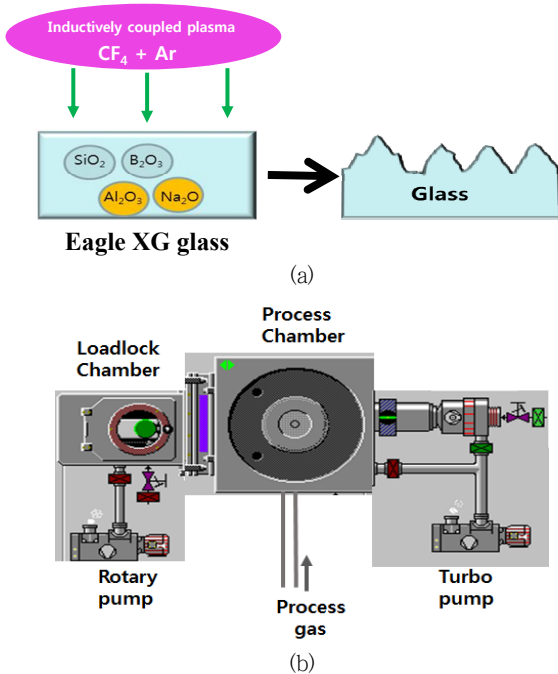


그림 1 (a) 활성 이온 식각 공정을 통한 유리 기판의 비 등방성 식각 공정 모식도 (b) RIE 실험장치에 대한 개념도

Fig. 1 (a)Anisotropic etching of Eagle XG glass substrates using reactive ion etching (RIE) and (b) schematics of RIE equipment used in this study

판은 Eagle XG를 이용하여 진행하였다. 공정 모식도 및 RIE 실험장비에 대한 개략도는 그림 1과 같이 묘사되어 있다.

식각된 유리 기판은 투과율 및 산란도 (haze)를 측정하여 광학적 특성을 평가하였으며 spectrophotometer 장비를 이용하였다. Haze 값은 total diffusive transmittance/total transmittance 로 계산하여 광 산란도를 평가하였다. 또한 표면 구조는 AFM (atomic force microscopy)를 이용하여 측정하였다. 평가된 유리 기판에 ZnO:Al 투명전극은 스퍼터링 공정을 통해서 증착하였고, 300 W의 RF 파워, 5 mT의 공정압력에서 순수 Ar 가스를 이용하여 증착하였다. 증착된 Glass/ZnO:Al 기판은 희석된 염산 (0.5 %)에 약 20초 간 습식 식각을 진행하여 최종적으로 표면 조직화된 투명 전극 코팅된 유리 기판을 형성하였다.

또한, haze 증가에 따라서 실리콘 박막태양전지의 효율이 증가할 수 있는지에 대한 예측을 위하여 advanced semiconductor analysis(ASA) 시뮬레이터를 활용하였다. 기존의 flat 기판에 대해서는 genpro1 광학 모델을 사용하여 소자 구조를 반영하였고, textured 기판의 haze 값을 반영하는 경우는 시뮬레이터 내부의 genpro3 모델을 사용하여 제안된 소자 구조를 반영하여 결과를 도출하였다.

3. 실험결과 및 토의

그림 2는 다양한 공정 압력에 따라서 활성 이온 식각 공정이 진행된 후, 먼저 spectrophotometer 장비를 이용하여 haze 값을 측정하였다. 입사광이 반도체 내부로 입사하면서 여러 방향으로 산란되는 광이 있고, 직선으로 투과하는 광이 있는데, 여기에서 전체 입사광 중에서 산란 광의 비율을 파라미터화 한 것이 haze 이다. 앞서 인용된 여러 실험 논문들 [8,9]에서 haze 값이 증가하면 전반적으로 입사광의 광경로가 길어지면서 실리콘 반도체 내부에 흡수될 수 있는 흡수 기회가 증가되기 때문에, 기판 상에서 haze 값을 증가시키는 것은 박막태양전지의 두께를 증가시키지 않고도 전체적인 효율을 증가시킬 수 있는 실질적인 기술 구현이 필요하다.

그림 2(a)에서 보는 바와 같이, 공정 압력이 낮을 때 비하여 압력이 점점 증가될수록 haze 값은 상승되는 결과를 가져옴을 확인하였다. 압력이 0.7 mT에서 7 mT까지 증가하면서, haze 값은 모든 파장 대역에서 증가하였다. 이는 입사광이 표면 조직화된 유리 기판을 통과하면서 더 많이 산란되며, 투명전극에서 산란되기 이전에 유리/투명전극 계면에서 상당한 광 산란을 발생시킬 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 또한, 공정 압력의 증가에 따라서 표면 조직화된 유리 기판의 표면 형상이 광 산란에 유리한 형태로 변화되고 있음을 의미한다. 유리 기판이 CF₄ 플라즈마에 의해서 식각될 때, 비휘발성 부산물(AlF₃, NaF, etc)들이 생기면서 이것이 다시 기판위에 퇴적되면서 식각이 되지 않는 미세 마스크(micro-mask) 기능을 하게 되고, 지속적인 플라즈마 식각이 비등방성 식각(anisotropic etching) 형태를 만들게 되는 것으로 알려져 있다 [10]. 이 과정에서 공정 압력이 증가하게 되면 이온의 mean free path가 감소하게 되며, 이것은 비휘발성 부산물들의 마스크 효과를 더욱 증대시키게 된다. 이를 통해서 지속

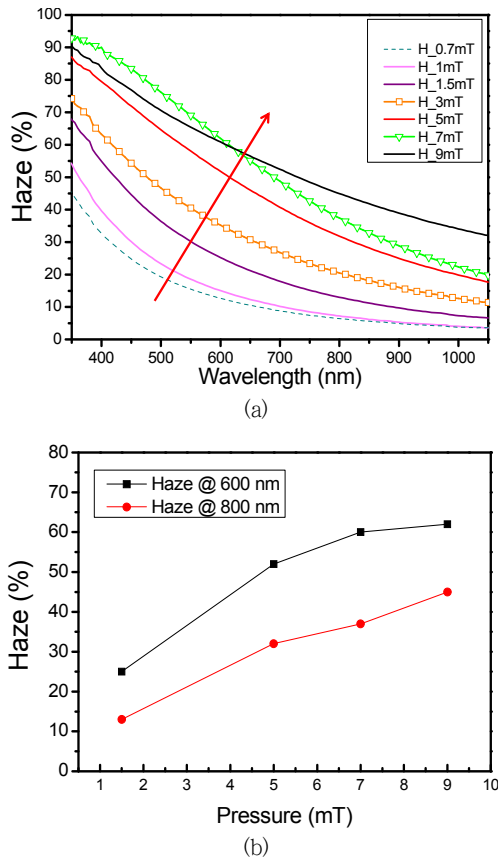


그림 2 (a) 활성 이온 식각 공정이 진행된 유리 기판의 공정 압력에 따른 광 산란도(haze) 스펙트럼, (b) 공정 압력의 변화에 따른 600 nm, 800 nm 파장 대역에서의 haze 값의 비교도

Fig. 2 (a) Haze spectra of glass substrates texture-etched with various working pressure, (b) haze variation at the spectral wavelengths of 600 nm and 800 nm as a function of the pressure

적인 식각은 등방성 식각보다는 비등방성 식각을 더 증가시키면서 표면 조직화 현상을 증가시키게 되는 것이다. 7 mT에서 9 mT로 증가시키면 600 nm 이상의 장파장 대역에서는 지속적으로 haze 값이 증가하는 한편, 600 nm 이하의 상대적인 단파장 대역에서는 haze 값이 감소하기 시작하고 있음을 알 수 있다. 이는 식각된 유리 기판 표면의 형상에 기인하는 현상으로 볼 수 있으며, 그림 2에서 설명될 것이다. 그림 2(b)를 보면 공정 압력 증가에 따른 haze 값의 변화를 보여주며, haze 값은 태양광 스펙트럼이 강한 가시광인 600 nm와 800 nm에서의 값을 추출하였으며 두 파장 대역에서 모두 haze가 증가되어 공정 압력을 증가시킬수록 우수한 광 특성을 갖는 기판을 확보할 수 있음을 확인하였다.

그림 3은 AFM 측정을 통해서 표면 형상을 분석한 결과들을 보여준다. 그림 3(a)는 낮은 압력에서 대표적으로 분석된 1.5 mT 공정 샘플의 표면을 보여준다. 낮은 공정 압력 영역에서는 식각

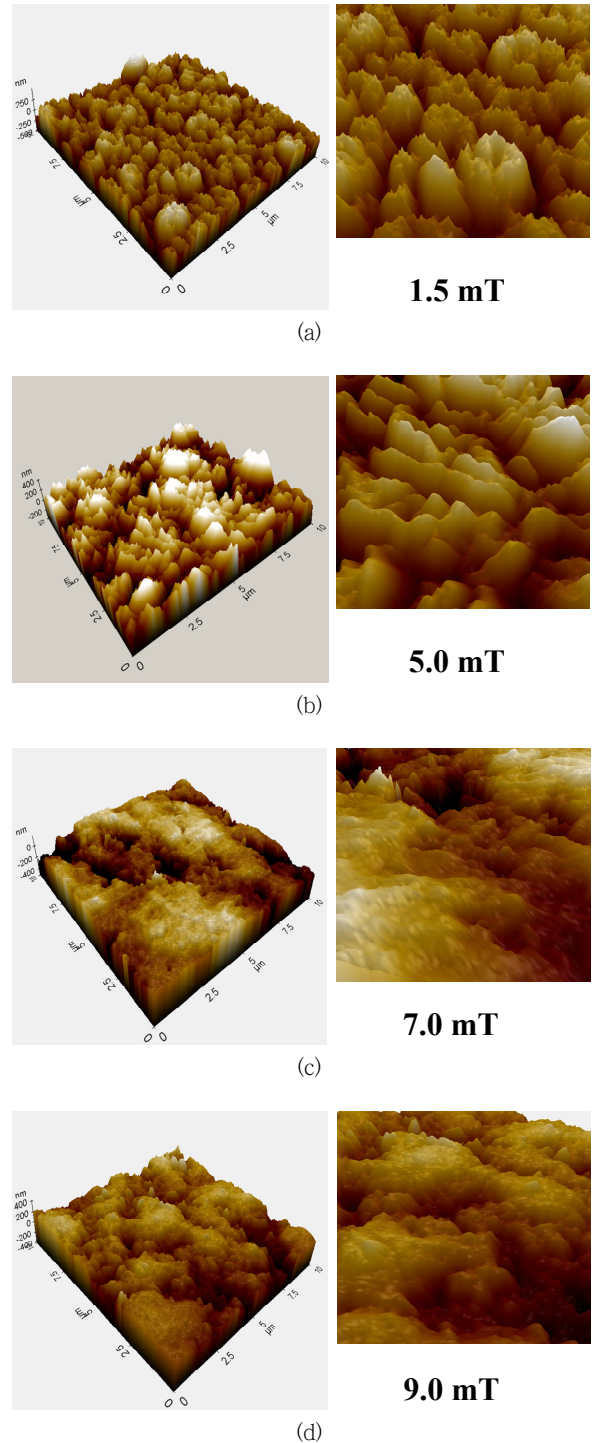


그림 3 다양한 공정 압력 (a) 1.5 mT, (b) 5.0 mT, (c) 7.0 mT, (d) 9.0 mT에서 표면 조직화 공정이 진행된 유리 기판의 표면 AFM 분석 이미지

Fig. 3 AFM surface topography images of surface textured glass substrates processed at various working pressures of (a) 1.5 mT, (b) 5.0 mT, (c) 7.0 mT, and (d) 9.0 mT

된 표면이 매우 뾰족하며 날카로우며, 깊은 V 모양의 계곡 형태를 이루고 있다. 이렇게 수직 방향으로 깊고 날카로운 표면의 경우, 이 위에 투명전극 및 미세결정 실리콘을 증착하여 태양전지를 만들 경우에 실리콘에 크랙이 발생하여 결합의 증가 및 소자 특성 측면에서 병렬 저항의 급감을 초래하게 된다. 공정 압력이 5 mT로 증가된 그림 3(b)의 경우, 날카로운 표면이 상대적으로 부드러운 모습으로 변화됨을 확인할 수 있었다. 그림 3(c)는 공정 압력이 7 mT로 식각 공정이 진행되었을 경우의 표면을 보여주는데, 앞서 1.5~5 mT의 경우에 대비해서 수직 방향으로 깊게 파인 부분이 훨씬 더 적어졌음을 확인할 수 있다. 그림 3(d)와 같이 9 mT까지 공정 압력이 증가된 경우 역시, 7 mT와 유사한 정도의 표면 조직화 구조를 보여주었다. 전반적으로 공정 압력을 상승시키면서 날카로운 표면 형상이 부드러워지면서 평평한 구조로 변화됨을 확인하였다. 이는 이 위에 성장될 미세결정 실리콘의 크랙 형성 억제에 도움이 되는 부분이다. 또한 그림 2에서 보는 것처럼, haze 특성도 매우 크게 개선이 되기 때문에 각각도의 측면에서 공정 압력을 증가시키는 것이 바람직하다. 단, 9 mT를 넘어서면서 단파장의 haze가 감소하기 시작했으며 이는 표면이 평평해지고 조직화된 V 모양의 opening angle 이 점점 더 커지는 과정에서 단파장의 빛이 산란되는 양이 줄어드는 것으로 해석할 수 있다. 따라서, 공정 압력을 9 mT 이상으로 더욱 증가시키는 것은 목적에 따라서 추가적으로 검토하여 각 응용 소자에 맞도록 진행할 필요가 있다. 9 mT에서 측정된 haze는 600 nm에서 61%, 800 nm에서 45%로써, 표면 조직화 처리를 하지 않은 경우는 보통 1~2% 내외의 haze 값을 보이기 때문에 상당한 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 즉, 유리 기판 자체에서 입사광의 산란 기능을 매우 효율적으로 해낼 수 있음을 의미한다. 이에 표면 조직화된 ZnO:Al 투명전극까지 추가되면, 더욱 강화된 입사광 산란도를 보일 수 있을 것으로 기대한다.

그림 4는 1.5 mT와 7 mT에서 식각 공정이 진행된 유리 기판

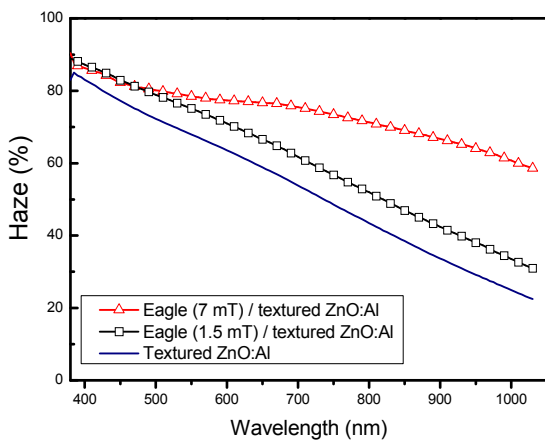


그림 4 표면 조직화된 ZnO:Al과 표면 조직화된 유리 기판 (Eagle)의 조합을 통한 광 산란도 평가

Fig. 4 Haze spectra of textured ZnO:Al transparent electrodes prepared on textured Eagle glass substrates that etched under various pressure (1.5 mT, 7 mT)

(Eagle) 위에 ZnO:Al 투명전극을 증착 후 추가적으로 표면 조직화 과정을 거친 기판의 haze spectrum을 보여주고 있다. ZnO:Al 투명전극의 표면 조직화 과정은 앞서 실험 과정에서 언급된 바와 같이 희석된 염산 용액을 통해 습식 식각 공정이 진행되었다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 식각되지 않은 평평한 glass 기판에 코팅된 ZnO:Al 대비하여, 표면 조직화된 유리 기판을 이용하는 경우는 전 파장 대역에서 더 높은 haze 특성을 나타내었다. 또한 1.5 mT에서 진행된 유리 기판 대비, 7 mT에서 식각 공정이 진행된 유리 기판이 더욱 우수한 특성을 보였으며, 특히 600 nm 이상의 장파장 대역에서 60~80%의 상당히 우수한 haze 특성을 보였다는 점이 인상적이다. 이는 그림 1에서 보는 것처럼, 7 mT에서 식각된 유리 기판이 상대적으로 매우 우수한 특성을 보였기 때문이다. 식각되지 않은 평평한 glass 기판에 코팅된 ZnO:Al의 haze 가 20~60%이라는 점을 감안하면, 장파장 대역에서 광 산란에 따른 광흡수도의 상승에 큰 기여를 하게 될 것이다.

그림 5에서는 7 mT에서 식각된 유리 기판에 ZnO:Al 투명 전극을 증착 후 표면 조직화 과정을 거친 기판의 표면을 분석한 AFM 이미지를 보여준다. 유리 기판의 표면 형상과, ZnO:Al 표면 조직화 형상이 합쳐져서 표면 modulation이 진행되었음을 보여주며, 장파장 대역의 빛을 더욱 많이 산란시킬 수 있도록 1-2 μm 사이즈의 crater가 많이 증가된 바, 이는 ZnO:Al 투명 전도막에서 기인하고 있다. 그림 3과 같이 장파장 대역을 포함한 전 파장 대역에서 60% 이상의 haze 값을 보여주며, 이렇게 매우 높은 광산란도는 기존의 ZnO:Al 투명 전도막에서는 쉽게 달성할 수 없는 수준의 광 산란도이다. 이러한 표면 조직화된 투명전극 ZnO:Al의 개발은 향후 미세결정 실리콘 태양전지 및 다양한 형태의 광 산란 기술에 널리 응용될 것으로 판단된다.

그림 6에서는 앞서 언급된 바와 같이 본 연구에서 개발된 기판이 박막태양전지의 효율 증가에 영향을 미칠 수 있을지 예측하기 위하여 ASA 시뮬레이션을 활용하여 본 실험결과를 반영하였다. 소자 구조는 일반적인 미세결정 실리콘 p-i-n 구조로 설계하

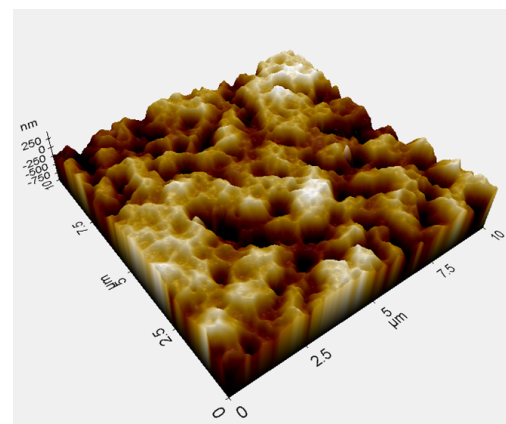


그림 5 표면 조직화된 유리 기판 위에 코팅된 표면 조직화 ZnO:Al의 AFM 표면 이미지

Fig. 5 AFM surface topography of textured ZnO:Al prepared on textured glass substrate

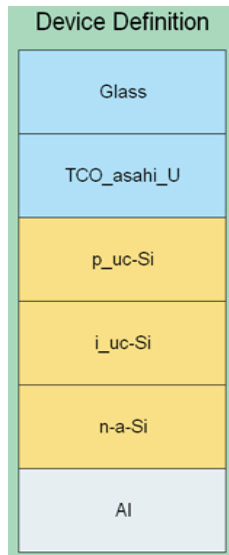


그림 6 ASA 시뮬레이터로 설계한 미세결정 실리콘 박막태양전지 구조

Fig. 6 Structure of microcrystalline silicon thin film solar cells designed by ASA (advanced semiconductor analysis) simulator

표 1 Flat 형태의 기판과 textured 형태의 기판에 제작된 미세결정 실리콘 박막 태양전지의 ASA 시뮬레이션을 통한 출력 특성

Table 1 Output performances of the microcrystalline silicon thin film solar cells with flat and textured substrates simulated with ASA

	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF	Efficiency (%)
Flat substrate	0.595	14.7	0.624	5.48
Textured TCO	0.587	18.9	0.613	6.83
Double texture	0.608	22.4	0.604	8.25

였으며 광흡수층 박막의 두께는 통상적으로 1 micron으로 설계하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 기존의 flat 기판을 이용하였을 때에 대비하여 그림 5에서 얻어진 표면 조직화 기판의 haze 값을 반영하여 시뮬레이션 된 박막태양전지의 출력 특성이 함께 나타나고 있다. 또한 출력 특성 파라미터 값들이 아래의 표 1에 정리되어 있다. 결과에서 보는 바와 같이, 표면 조직화 기판을 이용하였을 때, 다른 파라미터는 예상과 같이 큰 변화가 없었지만 단락전류(short circuit current, J_{sc}) 값이 18.9 mA/cm²에서 22.4 mA/cm²로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 입사광이 glass 표면 조직화 구조에 의해서 매우 크게 산란되면서 광 경로의 길이가 늘어났고, 이것이 한정된 박막 두께 내에서 효

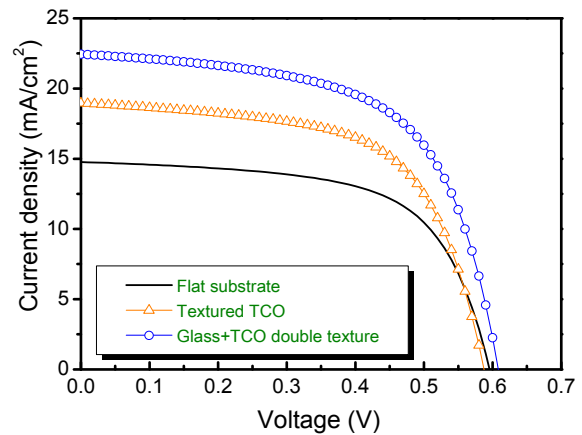


그림 7 Flat 형태의 기판과 glass texture 형태의 기판을 이용한 박막 태양전지의 시뮬레이션 된 전류-전압 특성 곡선

Fig. 7 Current-voltage characteristics of simulated microcrystalline silicon solar cells with flat and textured substrates.

율적으로 흡수되면서 광전류의 향상으로 이어졌음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 미세결정 실리콘 박막 태양전지의 효율이 약 6.38%에서 8.25%로 증가(flat 계면으로 구성된 소자의 경우는 5.48%)될 수 있음을 본 연구에서 확인하였다.

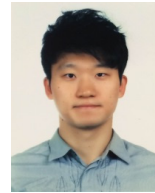
4. 결 론

본 연구에서는 태양광에너지 발전 소자로 각광 받고 있는 박막 실리콘 태양전지에서, 원가를 줄이면서도 효율을 높게 유지할 수 있는 방안으로 유리 기판의 표면 조직화 공정을 제안 및 실험을 진행하였다. 활성 이온 식각 공정 장비를 이용하여 다양한 공정 압력에 따른 식각된 유리 기판의 광학적 특성 및 AFM 표면 이미지 분석을 통해서 device에 응용할 수 있도록 최적화 과정이 진행되었다. 0.7 mT에서 9 mT까지 공정 압력이 변화되면서 광 산란도의 핵심 평가 기준인 haze 값이 전파장 대역에서 증가하였으며, 표면 형상 측면에서 보면 날카로운 표면에서 smooth 하고 평탄한 구조로 변화됨을 확인하였다. 이는 미세결정 실리콘 반도체 층의 플라즈마 증착 시에 결함 생성을 피할 수 있는 더욱 바람직한 구조가 됨을 확인하였다. 식각된 유리 기판위에 증착 및 표면 조직화된 ZnO:Al 투명 전극을 제작하는 공정을 통해서, 투명 전극 기판 전체적인 관점에서 평가할 때, 전 광학적 파장 대역에서 60~90%의 매우 우수한 haze 특성을 확보하였다. 이를 기초로 제작된 기판을 ASA 시뮬레이션을 진행하였으며, 표면 조직화 특성을 갖는 박막태양전지가 매우 큰 광전류의 향상을 통해서 효율의 증가로 이어짐을 확인하였다. 이는 향후 미세결정 실리콘 박막태양전지 뿐만 아니라 박막형 광소자에서 전기적 특성 및 광학적 산란도 특성을 모두 만족시키는 기판 형성 기술로 널리 이용될 수 있다.

References

- [1] B. Cai, X. Li, Y. Zhang and B. Jia, Significant light absorption enhancement in silicon thin film tandem solar cells with metallic nanoparticles, *Nanotechnology*, Vol. 27, pp. 195401, 2016.
- [2] F. J. Haug, T. Söderström, M. Python, V. Terrazzoni-Daudrix, X. Niquille, C. Ballif, Development of micro-morph tandem solar cells on flexible low-cost plastic substrates, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 93, pp. 884-887, 2009.
- [3] X. X. Zheng, X. D. Zhang, S. S. Yang, S. Z. Xu, C. C. Wei, Y. Zhao, Effect of the n/p tunnel junction on the performance of a-Si:H/a-Si:H/ μ c-Si:H triple-junction solar cells, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 101, pp. 15-21, 2012
- [4] K. Sriprapha, C. Piromjit, A. Limmanee, J. Sritharathikhun, Development of thin film amorphous silicon oxide/microcrystalline silicon double-junction solar cells and their temperature dependence, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 95, pp. 115-118, 2011.
- [5] B. Yan, G. Yue, L. Sivec, J. Yang, S. Guha, C.S-. Jiang, Innovative dual function nc-SiOx:H layer leading to a 16% efficient multi-junction thin-film silicon solar cell, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 99, pp. 113512, 2011.
- [6] L. Wei, X. Donglin, W. Huifang, Z. Xiuqian, Hydrogenated nanocrystalline silicon thin film prepared by RF-PECVD at high pressure, *J. Non. Cryst. Solids* Vol. 356, pp. 44-49, 2010.
- [7] J. Sritharathikhun, F. Jiang, S. Miyajima, A. Yamada, M. Konagai, Optimization of p-Type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide Window Layer for High-Efficiency Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 101603, 2009.
- [8] S. Fernández, O. De Abril, F.B. Naranjo, J.J. Gandía, High quality textured ZnO: Al surfaces obtained by a two-step wet-chemical etching method for applications in thin film silicon solar cells, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 95, pp. 2281-2286, 2011.
- [9] J. Müller, B. Rech, J. Springer, M. Vanecek, TCO and light trapping in silicon thin film solar cells, *Sol. Energ.*, Vol. 77, pp. 917-930, 2004.
- [10] X. Li, T. Abe, and M. Esashi, Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF₆ plasma, *Sensors Actuat. A Phys.*, Vol. 87, pp. 139-145, 2001.

저 자 소 개



강 동 원 (Dong-Won Kang)

1983년 9월 29일생. 2007년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2013년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업 (공학박사). 2015년~현재 청주대학교 태양광에너지공학과 조교수.
E-mail : kang@cju.ac.kr