

유연기판을 이용한 고효율 나노결정질 실리콘 박막 태양전지 제조

장은석 · 김솔지 · 이지은 · 안승규 · 박주형 · 조준식*
태양광연구소, 한국에너지기술연구원, 대전광역시, 305-343

Fabrication of Highly Efficient Nanocrystalline Silicon Thin-Film Solar Cells Using Flexible Substrates

Eunseok Jang · Sol Ji Kim · Ji Eun Lee · Seung Kyu Ahn · Joo Hyung Park · Jun-Sik Cho*

Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT: Highly efficient hydrogenated nanocrystalline silicon (nc-Si:H) thin-film solar cells were prepared on flexible stainless steel substrates using plasma-enhanced chemical vapor deposition. To enhance the performance of solar cells, material properties of back reflectors, n-doped seed layers and wide bandgap nc-SiC:H window layers were optimized. The light scattering efficiency of Ag back reflectors was improved by increasing the surface roughness of the films deposited at elevated substrate temperatures. Using the n-doped seed layers with high crystallinity, the initial crystal growth of intrinsic nc-Si:H absorber layers was improved, resulting in the elimination of the defect-dense amorphous regions at the n/i interfaces. The nc-SiC:H window layers with high bandgap over 2.2 eV were deposited under high hydrogen dilution conditions. The vertical current flow of the films was enhanced by the formation of Si nanocrystallites in the amorphous SiC:H matrix. Under optimized conditions, a high conversion efficiency of 9.13% ($V_{oc} = 0.52$, $J_{sc} = 25.45 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0.69$) was achieved for the flexible nc-Si:H thin-film solar cells.

Key words: silicon, thin-film, solar cell, conversion efficiency, light scattering

Nomenclature

nc-Si:H	: hydrogenated nanocrystalline silicon
nc-SiC:H	: hydrogenated nanocrystalline silicon carbide
V_{oc}	: open circuit voltage, V
J_{sc}	: short circuit current density, mA/cm^2
FF	: fill factor
ITO	: indium tin oxide
R_{total}	: total reflectance, %
$R_{diffuse}$: diffuse reflectance, %
PECVD	: plasma-enhanced chemical vapor deposition
BIPV	: building integrated PV

1. 서론

태양광발전의 경제성 확보를 위한 저가, 고효율 태양전지 개발이 전세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 이 중 실리콘 박막 태양전지는 값싸고 풍부한 실리콘 소재를 사용하고 대면적 및 대량생산이 가능한 장점을 갖고 있어 저가화가 가능한 차세대 태양전지로 많은 주목을 받아왔다¹⁻³). 특히 가볍고 유연한 플렉서블 기판을 사용한 플렉서블 실리콘 박막 태양전지는 설치 및 이동이 용이하고 깨지지 않는 장점을 갖고 있어 건물적용 태양광발전(BIPV)이나 휴대용 및 군사용 기기전원으로의 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다⁴⁻⁶). 플렉서블 기판 사용의 또 다른 장점은 롤투를 공정을 통한 양산화가 가능하여 기존의 유리기판을 사용하는 박막 태양전지에 비하여 제조단가를 획기적으로 낮출 수 있다는 것이다⁷). 그러나 실리콘 박막 태양전지가 갖고 있는 다양한 장점에도 불구하고 결정질 실리콘 태양전지나 다른 화합물 박막 태양전지에 비하여 상대적으로 낮은 효율은 개선해야 할 주요한 기술적 이슈이며 이를 위하여 태양전지 내에서의 광흡수를 향상시키는 광포획기술과 태양전지 소자를 구성

*Corresponding author: jscho@kier.re.kr

Received August 5, 2014; Revised August 18, 2014;

Accepted August 18, 2014

하는 박막 및 계면에서의 결함을 최소화하는 결함제어기술 그리고 광흡수층 및 도핑층에 사용되는 새로운 물질 개발 등이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 유연한 스테인레스 스틸(Stainless steel) 플렉서블 기판 위에 PECVD 공정을 이용하여 단일접합 nc-Si:H 박막 태양전지를 제조하였다. 태양전지의 효율향상을 위하여 표면텍스처링된 후면반사막과 n형으로 도핑된 씨앗층을 이용하여 초기 미세구조가 제어된 실리콘 광흡수층, 그리고 와이드밴드갭 윈도우층을 사용하였다. 각 단위공정의 특성과 이에 따른 태양전지 성능에 미치는 영향을 조사하여 물질특성을 최적화하였다.

2. 실험방법

후면반사막은 100 μm 두께의 스테인레스 스틸 기판 위에 4 inch Ag 금속 타겟과 2 wt% Al_2O_3 가 도핑된 ZnO (AZO) 타겟을 사용하여 DC 마크네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 스퍼터링 가스로는 Ar 가스를 사용하였으며 기판과 타겟의 거리는 100 mm를 유지하였다. 후면반사막의 표면텍스처링 형성을 위하여 기판 홀더 밑에 장착된 열선히터를 이용하여 기판온도를 200°C 까지 증가시켰다. Ag 후면반사막을 증착한 후에는 100 nm 두께의 ZnO:Al 박막을 증착하여 Ag 원소가 실리콘 박막 내로 확산되는 것을 방지하였다. 후면반사막 증착 후에 PECVD 장비를 이용하여 도핑층(doped layer)와 진성층(intrinsic layer) 실리콘 박막을 nip 구조로 증착하였다. 도핑층인 p와 n층 그리고 i층은 각각 13.56 MHz radio frequency (RF)와 60 MHz very high frequency (VHF) 글로우 방전을 사용하여 증착하였다. 실리콘 박막 증착은 SiH_4 와 H_2 혼합가스를 사용하였으며 p형과 n형 도핑을 위하여 B_2H_6 와 PH_3 가스를 사용하였다. p형 nc-SiC:H 윈도우층 증

착에는 CH_4 가스가 함께 사용되었다. 실리콘 박막 증착 후에는 상부전극으로 사용되는 ITO 박막을 RF 스퍼터링 방식으로 증착하였다. ITO 상부전극은 금속 마스크를 이용하여 0.25 cm^2 면적의 정사각형으로 증착하고 이를 태양전지 소자 면적으로 정의하였다. ITO 상부전극 증착 후에 생성된 전하의 원활한 수집을 위하여 열증발법을 이용하여 Al 그리드 전극을 추가로 증착하였다. Fig. 1은 nc-Si:H 박막 태양전지의 단면개략도와 실제로 제조된 태양전지의 TEM 단면사진을 나타낸 것이다.

제조된 박막 및 태양전지의 미세구조 분석을 위하여 SEM (scanning electron microscopy) 및 TEM (transmission electron microscopy) 분석을 수행하였으며 표면거칠기는 AFM (atomic force microscope)을 사용하여 측정하였다. 후면반사막과 태양전지 소자 표면에서의 반사도 측정은 uv-visible-nIR spectrometer를 사용하여 측정하였다. 제조된 태양전지 소자 내의 수직 전류흐름(vertical current flow)는 c-AFM을 이용하여 측정하였다. 태양전지 변환효율은 AM 1.5G (100 W/m^2) 광조사와 25°C의 표준조건 하에서 전류-전압 측정을 통하여 계산되었으며 입사파장에 대한 광응답특성은 외부양자효율(external quantum efficiency) 측정을 통하여 350 - 1100 nm 파장영역에서 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 후면반사막 특성

낮은 광흡수율을 갖는 실리콘 박막 광흡수층의 광이용을 향상을 위하여 광흡수층의 거친 계면에서의 입사광 산란을 통한 광포획(light trapping)기술이 사용된다. nip 구조를 갖는 nc-Si:H 박막 태양전지의 경우 광흡수층의 거친 표면형상은 일반적으로 후면반사막의 표면텍스처링에 의하여 형성되므로 태양전지 내의 효과적인 광흡수를 위해서는 넓은 파장영역에서 입사광을 효과적으로 산란시킬 수 있는 후면반사막의 표면텍스처링 형성이 매우 중요하다.

Fig. 2는 상온과 200°C에서 증착된 Ag 후면반사막의 표면 및 단면 SEM 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a, b)에서 보는 바와 같이 상온에서 증착된 후면반사막은 100 nm 이하의 작고 균일한 입자로 구성되어있으며 상대적으로 평탄한 표면을 나타낸다. AFM 분석을 통하여 측정된 평균 표면거칠기(root-mean square roughness, σ_{rms})는 12.5 nm이다. 증착온도를 증가시키는 경우에는 입자성장이 관찰되며 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 증착온도 200°C에서 증착된 후면반사막에서는 입자크기가 500 nm까지 증가한다. Fig. 2(d)에서 보는 바와 같이 입자성장과 함께 거친 표면이 형성되며 σ_{rms} 값은 53.4 nm까지 증가한다. 증착온도 증가에 따른 입자성장과 표면거칠

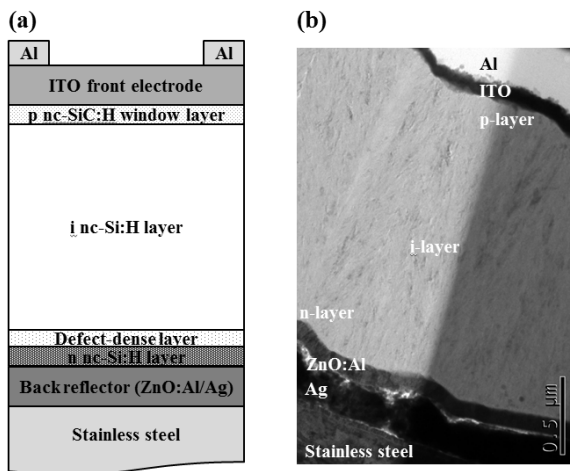


Fig. 1. nip 구조를 갖는 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지의 단면 개략도 (a)와 TEM 단면 사진 (b)

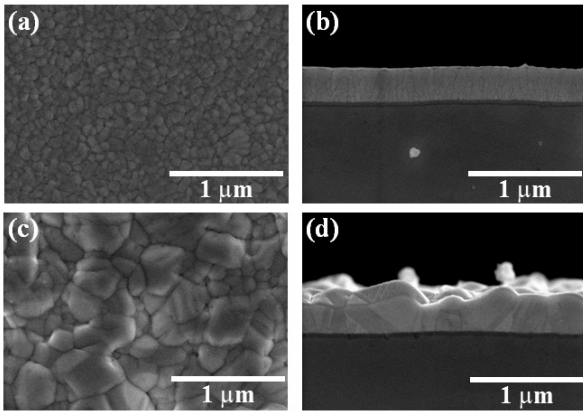


Fig. 2. 증착온도에 따른 Ag 후면반사막의 미세구조 변화를 나타내는 표면 및 단면 SEM 사진. (a, b) 25°C, (c, d) 200°C

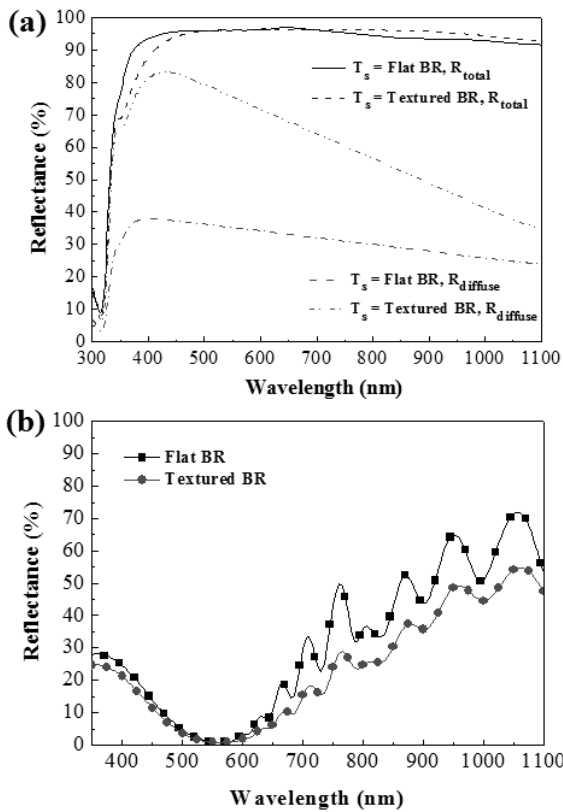


Fig. 3. Ag 후면반사막의 표면형상에 따른 총 반사도와 확산 반사도 변화 (a) 및 이를 이용한 nc-Si:H 박막 태양전지의 표면반사 특성 (b)

기 증가는 Structure Zone Model (SZM)로 설명되어질 수 있다⁸⁾. 작은 입자들의 표면에너지를 감소시키기 위하여 빠르게 성장하는 큰 입자에 의하여 작은 입자의 병합이 이루어지고 비정상적인 입자성장(abnormal grain growth)이 유발된다. 이를 통하여 입자크기의 불균일성과 함께 표면 텍스처링이 형성된다⁹⁾. 따라서 Fig 2에서 관찰되는 Ag 후면반사막의 표면텍스처링 형성은 증착온도 증가에 따른 Ag 입자의 비정상 입자 성장에 기인한 결과라고 할 수 있다. 일반적으로 반사되는 표면에서의 빛의 산란

은 표면거칠기와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 앞에서 제조된 후면반사막에 대한 광학적 특성 분석을 위하여 총 반사도(R_{total})과 확산 반사도($R_{diffuse}$)를 측정하였으며 이를 Fig 3(a)에 나타내었다.

총 반사도의 경우, 평탄한 표면과 텍스처링된 표면을 갖는 후면반사막 모두에서 400 - 1000 nm 파장영역에서 90%이상의 높은 반사도를 나타내었다. 그러나 확산 반사도의 경우는 평탄한 표면의 후면반사막에서는 40%이하의 낮은 값을 나타내는 반면, 텍스처링된 표면에서의 확산 반사도는 400 nm의 단파장 영역에서는 80%까지 증가하였다가 파장이 증가됨에 따라 점차로 감소하여 1100 nm에서는 40%의 값을 나타낸다. 일반적으로 단 파장 영역의 빛은 p층에서 가까운 i층 영역에서 대부분 흡수되어 후면반사막의 표면텍스처링 영향이 적은 것으로 알려져 있다. 반면 장파장 영역의 입사광은 광흡수층 내에서 모두 흡수되지 못하고 후면반사막까지 도달하고 후면반사막 표면에서 반사되어 광흡수층으로 되돌아감으로 후면반사막의 텍스처링에 의한 영향을 받게 된다. 따라서 600 nm 이상의 장파장 영역에 대한 후면반사막의 산란특성이 중요한 것으로 간주된다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 표면 텍스처링된 후면반사막의 경우 600 nm 이상의 장파장 영역에서도 평탄한 표면에 비하여 높은 확산 반사도를 나타내고 있어 광흡수층 내의 광흡수율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 후면반사막의 표면텍스처링에 따른 태양전지의 광흡수도 영향을 조사하기 위하여 후면반사막 위에 nc-Si:H 박막 태양전지를 제조하고 태양전지 표면 반사도를 측정하였다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 표면 텍스처링된 후면반사막 위에 제조된 태양전지의 표면 반사가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히, 600 nm 이상의 장파장 영역에서의 반사도가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이는 표면 텍스처링된 후면반사막 위에서 증가된 입사광 산란에 기인한 것으로 판단된다. 또한 표면 텍스처링된 후면반사막 위에서 제조된 태양전지의 반사도에서는 증가된 산란에 의하여 빛의 간섭효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 장파장 영역에서의 효과적인 빛 산란을 통하여 광흡수를 향상시키고 이를 통하여 단락전류밀도가 증가될 것으로 기대할 수 있다.

3.2 n층 결정화에 따른 i층 초기성장 제어

nc-Si:H 박막 태양전지에 사용되는 나노결정질 실리콘 광흡수층의 미세구조는 태양전지 성능에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 나노결정질 실리콘의 형성은 주로 플라즈마 반응 내의 수소에 의한 비정질 실리콘 에칭의 결과이다. 나노결정질 실리콘의 결정화도는 플라즈마 내의 수소함량과 더불어 성장하는 박막 두께에 영향을 받는다¹¹⁾. 일반적으로 막 두께가 증가할수록 결정화도가 증가하는 것으로 알려져 있으며 나노결정질 실리콘 박막 성장초기에는 비정질 영역이 포함되어있다. 비정

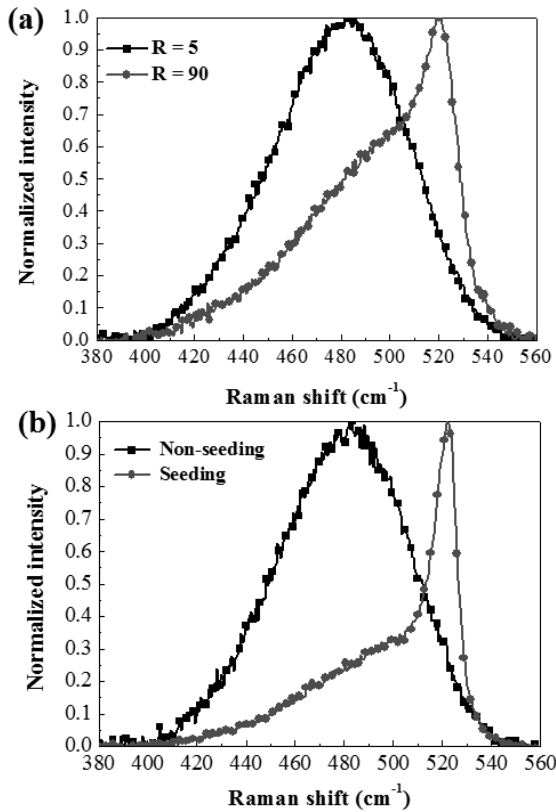


Fig. 4. 수소함량에 따른 n층의 결정화도 변화 (a) 및 서로 다른 결정화도를 갖는 n층 위에 증착된 200 nm 두께의 나노결정질 실리콘 광흡수층의 결정화도 변화 (b)

질 영역에서는 많은 결함이 존재하여 생성된 광전하의 재결합이 촉진되고 장파장 영역에 대한 낮은 광흡수율로 인하여 태양전지 성능이 떨어지게 된다. 따라서 나노결정질 실리콘 광흡수층의 초기성장단계에서 미세구조를 제어하고 비정질 영역의 형성을 억제하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 n 도핑층을 씨앗층으로 이용하여 그 위에 증착되는 나노결정질 실리콘 광흡수층의 초기성장 모드를 제어하고자 하였다.

Fig. 4(a)는 $R(H_2/SiH_4)$ 값에 따른 n층의 결정화도를 나타낸 라만분석결과이다. 플라즈마 내에 낮은 수소함량을 포함하는 경우($R=5$), 비정질상에 해당하는 피크가 480 cm^{-1} 에서 관찰된다. R 값이 90까지 증가하면 510 과 520 cm^{-1} 에서 강한 피크가 생성되며 이는 n층 박막이 결정화되었음을 나타낸다. Gaussian fitting을 통하여 라만 스펙트럼을 분석하는 경우 약 73%의 결정화도 값을 얻을 수 있다. Fig. 4(b)는 n층으로 비정질 층과 73%의 결정화도를 갖는 씨앗층을 이용하여 그 위에 200 nm 두께로 증착된 나노결정질 실리콘 광흡수층의 결정화도를 분석한 라만 측정 결과이다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 n층으로 비정질층을 사용한 경우(non-seeding)에서는 비정질 상태의 실리콘 광흡수층을 얻을 수 있다. 반면에 결정화도를 갖는 씨앗층을 n층으로 사용한 경우에는 높은 결정화도를 갖는 나노결정질 실리콘

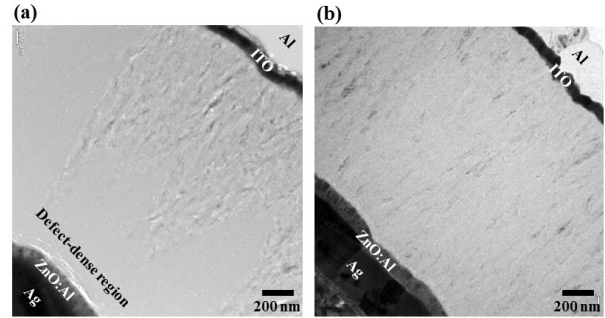


Fig. 5. 비정질 n층 (a)과 결정화도가 높은 n층 (b)을 사용하여 제조된 nc-Si:H 박막 태양전지의 단면 TEM 사진

광흡수층을 얻을 수 있으며 결정화도는 약 80%에 이른다. 따라서 n형 씨앗층을 사용하는 경우 나노결정질 실리콘 광흡수층의 초기 성장단계에서 생성될 수 있는 결함이 많은 비정질 영역의 생성을 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 n층으로 비정질층과 씨앗층을 사용하여 제조된 nc-Si:H 박막 태양전지의 미세구조를 나타내는 단면 TEM 사진이다. 비정질 n층을 사용한 경우(Fig. 5(a)), 밝은 회색으로 나타나는 비정질 영역이 광흡수층 성장 초기영역에 형성되며 막 두께가 증가함에 따라 점차로 결정화가 이루어지는 것을 알 수 있다. 이때 형성되는 비정질 영역의 두께는 수백 nm에 이르는 것으로 관찰된다. 결정화도가 높은 씨앗층을 n층으로 사용한 경우에는 나노결정질 실리콘 광흡수층 초기영역부터 결정화가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 4(b)에서 얻은 라만분석결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 결정화도가 높은 n층을 씨앗층으로 사용하여 나노결정질 실리콘 광흡수층 초기성장시 생성되는 결함이 많은 비정질 영역을 제거할 수 있으며 이로부터 광전하의 재결합을 억제하고 장파장에 대한 응답성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

3.3 수소패시베이션에 따른 와이드 밴드갭 p층 특성

최근에 기존의 비정질이나 나노결정질 실리콘보다 큰 밴드갭을 갖는 와이드밴드갭 실리콘계 화합물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{12,13}. 대표적인 물질로는 수소패시베이션된 실리콘카바이드(a-, nc-SiC:H)와 실리콘산화물(a-, nc-SiO:H)이 있으며 2.0 eV 이상의 높은 밴드갭을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 와이드밴드갭 nc-SiC:H 박막을 nc-Si:H 박막 태양전지의 윈도우층으로 적용하였다.

Fig. 6은 플라즈마 내의 수소함량에 따른 nc-SiC:H 박막의 밴드갭 및 Si-C 결합밀도 변화를 나타낸 것이다. 여기서 탄소결합을 형성하기 위한 반응가스로는 CH_4 가 사용되었으며 주입량은 일정하게 유지되었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 $R(H_2/SiH_4)$ 값이 90에서 260으로 증가함에 따라 밴드갭이 2.08 eV에서 2.25 eV까지 증가함을 알

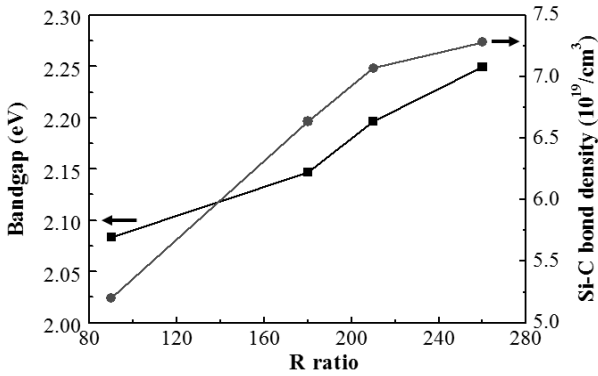


Fig. 6. 수소함량에 따라 제조된 nc-SiC:H 박막의 밴드갭 및 Si-C 결합밀도 변화

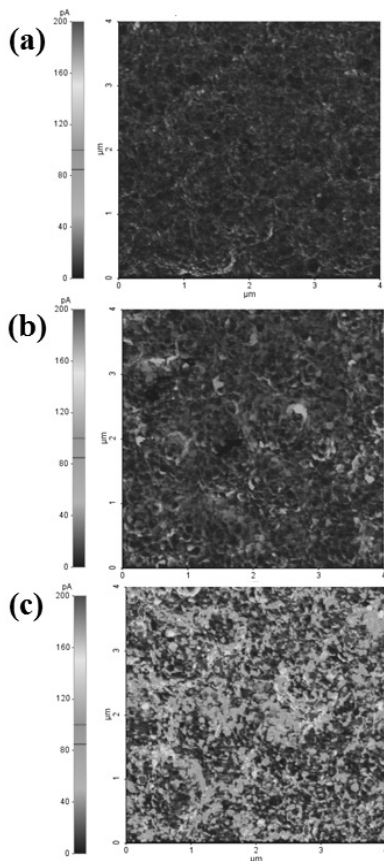


Fig. 7. 수소함량에 따라 제조된 와이드밴드갭 nc-SiC:H 박막을 윈도우층으로 사용한 nc-Si:H 박막 태양전지의 c-AFM 측정결과. (a) R= 90, (b) = 180, (c) = 220

수 있다. 이때 Si-C 결합밀도도 $5.2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 에서 $7.3 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 로 함께 증가한다.

플라즈마 내의 수소함량(R값) 증가에 따른 Si-C 결합밀도의 증가는 증착과정 중에 상대적으로 결합력이 약한 Si-Si 결합이 플라즈마 내의 수소에 의하여 우선적으로 에칭된 결과이다. 그러나 높은 R값에서 증착된 박막의 경우에도 화학양론적인 SiC에서 관찰되는 $1.8 \times 10^{23}/\text{cm}^3$ 에 비하여 낮은 Si-C 결합밀도를 나타낸다. 따라서 증착된 박막은 SiC와 Si이 서로 혼재되어있는

구조를 갖고 있는 것으로 판단된다. XRD 분석결과나 라만분석 결과에서는 어떠한 결정성의 피크도 관찰되지 않으며 이로부터 비정질상의 박막이 얻어짐을 알 수 있다. 와이드밴드갭 윈도우층의 사용은 built-in potential의 증가와 함께 p/i 계면에서의 장벽형성을 통하여 electron back-diffusion을 억제함으로써 V_{oc} 를 증가시키는 것으로 알려져 있다¹³⁾. 또한 단파장 영역에서의 광투과성 증대로 J_{sc} 를 증가시켜주는 장점을 갖고 있다. 반면에 큰 밴드갭으로 인하여 박막내의 전기전도도가 감소하여 FF를 감소시킬 수 있다. 특히 박막내의 수직전류흐름(vertical current flow)가 중요하다. 실리콘계 화합물 형성 시 플라즈마 내의 높은 수소 함량을 통하여 수 nm 수준의 나노결정질 실리콘 입자가 형성되는 결과가 최근에 보고되고 있으며 이를 이용하여 수직전류흐름을 향상시키는 결과가 발표되고 있다¹⁴⁾. R값에 따라 증착된 박막의 미세구조를 고배율 TEM으로 분석한 결과 R값이 180 이상인 경우에서 비정질 매트릭스 내에 실리콘 나노결정(Si nanocrystallite)가 생성되는 것을 확인할 수 있으며 R값이 증가함에 따라 나노결정의 크기는 줄어들고 입자밀도는 증가하는 것을 알 수 있다. 실리콘 나노결정의 형성과 입자밀도 증가는 박막 내의 전기전도도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 7은 서로 다른 R값으로 증착된 p층을 윈도우층으로 사용한 nc-Si:H 박막 태양전지의 c-AMF 측정결과이다. 낮은 수소함량에서 제조된 p층의 경우(R = 90) 수직전류흐름이 매우 낮은 것을 알 수 있다. R값이 180으로 증가하는 경우 수직전류흐름이 점차로 증가하며 R값을 220까지 증가시키면 높은 전류흐름을 나타내는 부분이 늘어난다. 높은 전류흐름을 나타내는 영역은 비정질 매트릭스 내에 수소에칭을 통하여 형성된 실리콘 나노결정에 의하여 전자의 흐름이 향상되기 때문이며 높은 입자밀도를 갖는 박막일수록 전기전도도가 향상되는 것으로 생각된다. 이로부터 강화된 수소패시베이션을 통하여 2.2 eV이상의 높은 밴드갭과 우수한 수직전류흐름을 갖는 nc-SiC:H 윈도우층을 얻을 수 있었다.

3.4 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지 성능

앞 절에서 설명한 표면텍처링된 Ag 후면반사막과 결정화도가 높은 n형 씨앗층 그리고 와이드밴드갭 nc-SiC:H 윈도우층을 사용하여 고효율의 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지를 제조하였으며 표준조건에서 측정된 photo I-V 곡선과 태양전지 성능 특성을 Fig. 8과 Table 1에 각각 나타내었다.

제작된 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지는 9.13%의 변환효율을 나타내었으며 이때 V_{oc} 는 0.52 V, J_{sc} 는 $25.45 \text{ mA}/\text{cm}^2$, 그리고 FF는 0.69를 나타내었다. Fig. 8(b)의 EQE 곡선으로부터 600 nm이상의 장파장 영역에서의 광간섭 효과가 크게 줄어들었음을 알 수 있으며 이는 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 표면텍스

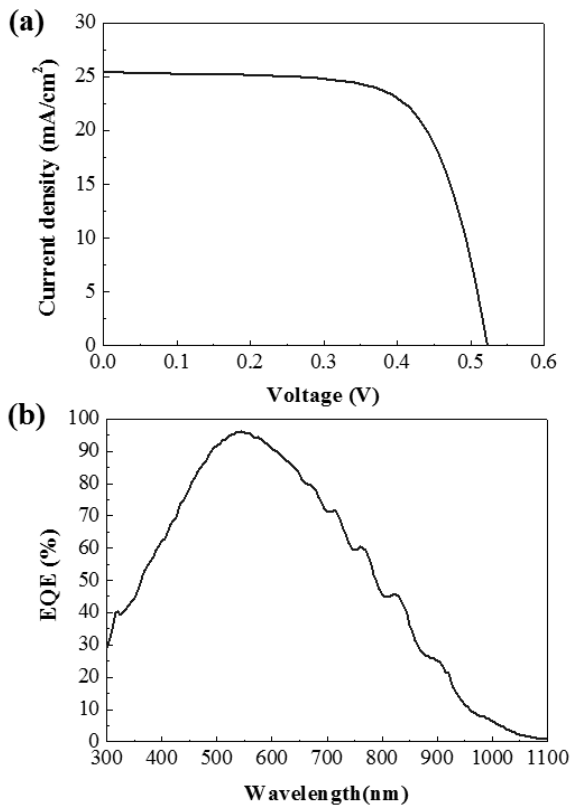


Fig. 8. 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지의 표준 조건에서의 photo I-V 곡선 (a)과 외부양자효율 (EQE) 그래프 (b)

Table 1. 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지 성능

Sample	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	Eff. (%)
nc-Si:H	0.52	25.45	0.69	9.13

처링된 후면반사막 위에서의 광산란 효과가 증가하였기 때문이다. 또한 단파장 영역에서의 흡수도 증가되며 이는 p층으로 사용된 nc-SiC:H 윈도우층의 높은 밴드갭 영향이다. 와이드밴드갭 윈도우층을 사용하고도 0.69의 높은 FF값을 나타내며 c-AFM 결과에서 확인한 바와 같이 와이드밴드갭 p층 내의 실리콘 나노결정 형성에 따라 수직전류흐름이 향상되었기 때문으로 판단된다. n형 씨앗층 사용을 통하여 나노결정질 실리콘 광흡수층의 초기 비정질 형성을 억제한 것도 우수한 태양전지 성능에 기여한 것으로 판단된다.

4. 결론

플렉서블 스테인레스 스틸 기판을 사용하여 단일접합 nc-Si:H 박막 태양전지를 제조하였다. 고효율의 태양전지를 제조하기 위하여 표면텍스처링된 Ag 후면반사막, n형 씨앗층 그리고 와이드밴드갭 nc-SiC:H 윈도우층을 사용하고 각각의 전기광학적 특성 및 태양전지 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 표면텍스

처링된 Ag 후면반사막을 사용하여 600 nm 이상의 장파장 영역에서 광산란 증대효과 및 태양전지 내에서의 광흡수 향상결과를 얻을 수 있었으며 n형 씨앗층을 사용하여 나노결정질 실리콘 광흡수층의 초기성장에서 형성되는 결함이 많은 비정질 영역을 최소화 할 수 있었다. 높은 수소함량을 갖는 플라즈마 조건에서 2.2 eV 이상의 큰 밴드갭을 갖는 nc-SiC:H 윈도우층을 얻을 수 있으며 수소에칭을 통하여 비정질 매트릭스 내에 실리콘 나노결정이 형성되고 박막 내의 수직전류흐름이 크게 개선되는 것을 확인하였다. 광포획 특성 향상과 계면제어, 와이드밴드갭 실리콘계 화합물 사용을 통하여 9.13%의 고효율 플렉서블 nc-Si:H 박막 태양전지를 제조할 수 있었다.

후 기

This work was supported by the Global Frontier R&D Program on Center for Multiscale Energy System funded by the National Research Foundation under the Ministry of Science, ICT & Future, Korea (2011-0031578).

References

- Shah, A.V., Meier, J., Vallat-Sauvain, E., Wyrsh, N., Kroll, U., Droz, C. Graf, U., "Material and solar cell research in microcrystalline silicon", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 78, pp. 469-491, 2003.
- Meier, J., Fluckiger, R., Keppner, H., Shah, A.V., "Complete microcrystalline p-i-n solar cell-Crystalline or amorphous cell behavior?", *Appl. Phys. Lett.*, 65, pp. 860-862, 1994.
- Guha, S., Yang, J., Yan, B., "High efficiency multi-junction thin film silicon cells incorporating nanocrystalline silicon", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 119, pp. 1-11, 2013.
- Söderström, T., Haug, F.-J., Terrazoni-Daudrix, V., Ballif, C., "Optimization of amorphous silicon thin film solar cells for flexible photovoltaics", 103, 114509, 2008.
- Pagliaro, M., Palmisano, G., Ciriminna, R., *Flexible Solar Cells*, Wiley-VCH, Weinheim, pp. 1-5, 2008.
- Cho, J.S., Baek, S., Park, S.H., Park, J.H., Yoo, J., Yoon, K.H., "Effect of nanotextured back reflectors on light trapping in flexible silicon thin-film solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 102, pp. 50-57, 2012.
- Donker, M.N., Gordijn, A., Stiebig, H., Finger, F., Rech, B., Stannowski, B., Bartl, R., Hamers, E.A.G., Schlatmann, R., Jongerden, G.J., "Flexible amorphous and microcrystalline silicon tandem solar modules in the temporary superstrate concept", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 91, pp. 572-580, 2008.
- Thompson, C.V., "Structure evolution during processing of polycrystalline films", *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 30, pp. 159-190, 2000.

9. Adamik, M., Barna, P.B., Tomov, I., "Correlation between texture and average grain size in polycrystalline Ag thin films", *Thin Solid Films*, 359, pp. 33-38, 2000.
10. Franken, R.H., Stolk, R.L., Li, H., van der Werf, C.H.M., Rath, J.K., Schropp, R.E.I., "Understanding light trapping by light scattering textured back electrodes in thin film n-i-p type silicon solar cells", *J. Appl. Phys.*, 102, 014503, 2007.
11. Shah, A, *Thin-Film Silicon Solar cells*, EPFL press, Lausanne, pp. 118-122, 2010.
12. Kar, D., Da, D., "Conducting wide band gap nc-Si/a-SiC:H films for window layers in nc-Si solar cells", *J. Mater. Chem. A*, 1, pp. 14744-14753, 2013.
13. Biron, R., Pahud, C., Haug, F.-J., Ballif, C., "Origin of the V_{oc} enhancement with a p-doped nc-SiO_x:H window layer in n-i-p solar cells", *J. Non-Cryst. Solids*, 358, pp. 1958-1961, 2012.
14. Yan, B., Yue, G., Sivec, L., Yang, J., Guha, S. Jiang, C.S., "Innovative dual function nc-SiO_x:H layer leading to a > 16% efficient multi-junction thin-film silicon solar cell", *Appl. Phys. Lett.*, 99, 113512, 2011.