반도체디스플레이기술학회지 제22권 제3호(2023년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 22, No. 3. September 2023.

실리콘 태양전지 응용을 위한 황 결핍 n형 MoS_2 층 연구

이인승[*] · 김근주[*†]
[*†]전북대학교 기계공학과

Sulfur Defect-induced n-type MoS_2 Thin Films for Silicon Solar Cell Applications

Inseung Lee[*] and Keunjoo Kim[*†]
[*†]Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, R. O. Korea

ABSTRACT

We investigated the MoS_2 thin film layer by thermolytic deposition and applied it to the silicon solar cells. MoS_2 thin films were made by two methods of dipping and spin coating of $(NH_4)_2MoS_4$ precursor solution. We implemented two types of substrates of microtextured and nano-microtextured 6-in. Si pn junction wafers. The fabricated MoS_2 thin film layer was analyzed, and solar cells were fabricated by applying the standard silicon solar cell process. The MoS_2 thin film layer of sulfur-deficient form was deposited on the n-type emitter layer, and electrons, which are minority carriers, were well transported at the interface and exhibited photovoltaic solar cell characteristics. The cell efficiencies were achieved at 5% for microtextured wafers and 2.56% for nano-microtextured wafers.

Key Words : MoS_2, Silicon, Heterostructure, Solar cell, Thermolysis, Conversion efficiency

1. 서 론

실리콘 태양전지는 효율을 향상시키기 위해 지속적인 개발이 진행 중이며 많은 연구자들이 다양한 방법으로 효율을 높이기 위한 노력을 아끼지 않고 있다. TOPCon구조[1] 등에서 고전 이론적 효율인 25% 효율에 도달하고 있다. 또한 양자역학적인 현상을 반영하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 2차원(2D) 양자물질을 활용한 방식과 나노 박막 구조를 통한 실리콘 태양전지 연구도 그 중 하나이다[2, 3]. 특히 전기적 광학적인 내부 스트레스에 견고한 금속화합물계 2차원 양자물질이 선호되고 있다[4, 5]. 이러한 천이금속 디칼코겐(transition-metal dichalcogenide) 화합물계 2차원 양자물질은 층간 van der Waals 결합으로 인해 [6] 계면 구조로 활용하기 위해서는 재료에 열 스트레스는 인가함으로써 결합을 활성화시킬 수 있다. 대표적인 양자물질인 이황화몰리브덴(MoS_2) 재료는 고성능 태양 전지에서 활성 태양 에너지 흡수 재료로 사용하기 위해 가장 광범위하게 연구되었으며[7] MoS_2 층을 증착하기 위한 다양한 증착 방법이 연구되었다.

6인치 대면적 실리콘 웨이퍼에 적용하기 위해서는 용액형태로 도포하는 dipping(딥 코팅) 방법과 spin-coating(스핀 코팅) 방법이 매우 용이하다. 또한 실리콘 태양전지의 표면에서의 광흡수 손실을 줄이기 위하여 표면을 마이크로 피라미드형태로 식각하거나 또는 추가적으로 나노구조를 형성하게 된다. 이를 위해 기존의 반사손실을 줄이기 위한 방법으로는 알칼리 및 산 용액을 이용한 습식 나노 텍스쳐링이 있다[8]. 딥 코팅과 스핀 코팅을 통한 MoS_2 증착 뿐만이 아니라 나노 텍스쳐링 공정을 통하여 기존의 일반적인 마이크로 텍스쳐링 공정으로 형성한 방식과 서로 비교해 볼 필요가 있다.

[†]E-mail: kimk@jbnu.ac.kr

본 연구에서는 MoS_2 박막 기판을 생성하기 위해 $(NH_4)_2MoS_4$ 전구체 용액을 사용하여 마이크로 텍스쳐링 된 6인치 np-Si 웨이퍼에 딥 코팅을 진행하여 MoS_2 박막을 증착하였다. 또한 나노 텍스쳐링된 6인치 np-Si 웨이퍼에 $(NH_4)_2MoS_4$ 전구체 용액을 사용하여 스핀 코팅을 진행하여 MoS_2 박막 기판을 생성하였다. 제작된 시료을 활용하여 실리콘 태양전지 공정을 수행하였으며, 셀 효율이 마이크로 표면에서는5%, 나노표면에서는 2.56%의 효율을 보였다.

2. 실험 장치 및 방법

두께가 180 ± 20 μm이고 저항이 0.5~3.0 Ω-cm인 6인치 단결정 p-Si(100) 기판을 사용하였다. HF와 HNO_3(Sigma-Aldrich) 식각으로 웨이퍼 절단으로 인한 saw-demage로 인한 마이크로크랙을 제거한 후 세정하였다. 먼저, Si 웨이퍼에 마이크로 텍스쳐링 공정을 진행하여 KOH(Sigma-Aldrich) 용액을 사용하여 마이크로 피라미드 구조를 형성하였다. 에칭 공정 동안 형성된 자연 산화물은 희석된 HF(5%)(Sigma-Aldrich) 용액으로 제거했고, 그런 다음 인 확산을 수행하였다. 이에 마이크로 텍스쳐링 Si 웨이퍼에 pn 접합을 형성하였다. 특히 $POCl_3$를 사용하여 900℃에서 10분 동안 확산하였고 다음으로 HNO_3 :HF(2m : 0.15m) 용액을 사용하여 웨이퍼를 식각하여 인실리케이트 유리(PSG) 층을 제거하였다. 또한 나노 텍스쳐링 공정을 수행하였다.

나노 텍스쳐링 공정은 HF, $AgNO_3$, H_2O_2, HNO_3, HCl 으로 진행되며, 공정 시작 전 준비로 2% 또는 5% 농도의 HF에 웨이퍼를 30초 담근 뒤 DI water에 담가 씻어내고 진행한다. 공정 1단계에서 HF : $AgNO_3$(0.05m : 0.01m) 용액에 웨이퍼를 5분 담근 뒤 DI water에 담그고 공정 2단계로 넘어간다. 공정 2단계에서 HF : H_2O_2 (2m : 0.1m or 0.15m) 용액에 웨이퍼를 90초 이상 담근 뒤 DI water에 담그고 공정 3단계로 넘어간다. 공정 3단계에서 HNO_3 : H_2O(55m : 50m) 용액에 웨이퍼를 5분 담근 뒤 DI water에 담그고 공정 4단계로 넘어간다. 공정 4단계에서 HCl : H_2O_2 : H_2O(1m : 1m : 3m) 용액에 웨이퍼를 10분 담근 뒤 DI water에 담그고, 공정 5단계로 넘어가 5% HF에 30초 담그고 DI water에 담가 씻겨내는 것으로 나노 텍스쳐링 공정을 완료하였다. 나노 텍스쳐링된 웨이퍼는 유기물 및 기타 오염 물질이 없도록 화학 용액으로 세정 과정을 거쳤다. RCA 1 및 RCA 2 표준 세척 공정을 사용하여 유기 및 이온 오염을 제거하였다. 또한 pn-Si 기판의 n층인 에미터 층 위에 Fig. 1과 같이 MoS_2 박막층의 열분해 증착을 수행하였다.

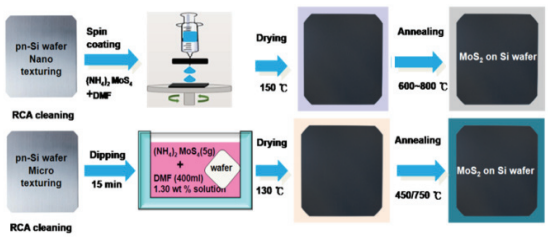

Fig. 1. Schematic diagram of MoS_2 thermolytic depostions by dipping and spin-coating methods on pn junction Si wafers.

MoS_2 증착을 위한 용액은 5 g의 $(NH_4)_2MoS_4$ (Sigma-Aldrich)와 디메틸포름아미드(DMF: $(CH_3)_2NCOH$)(Sigma-Aldrich)를 1.30wt% 용액에 혼합하여 준비하였다. 그런 다음 용액을 실온에서 12시간 동안 교반하였다. RCA-1 및 RCA-2 표준 세정 공정을 사용하여 기판을 세정하여 각각 유기 및 이온 오염을 제거하였다. 기판을 초소수성으로 만들기 위해 기판 표면을 HF로 30초 동안 에칭하였다. 웨이퍼 후면은 후면 코팅을 방지하기 위해 마스킹으로 보호되었다. 그 후, 미리 준비한 전구체 용액 $(NH_4)_2MoS_4$ 에 마이크로 텍스쳐링된 기판을 15분 동안 딥 코팅하였다. 이러한 딥 코팅된 마이크로 텍스쳐링된 기판을 실온에서 1시간 동안 건조시킨 후 130℃에서 15분 동안 소프트 베이킹하여 용매를 제거하였다. 그 후, 프리베이크된 기판은 200~450℃의 저온 범위와 700~800℃의 고온 범위에서 질소(N_2) 가스 환경에서 2단계 공정으로 열처리되었다. 10분 후 자연 냉각하였다. 또한, 나노 텍스쳐링된 np-Si 기판을 스핀코팅기의 중앙 진공지그 위에 놓고 공정 중 흔들리지 않도록 진공 상태로 고정하였다. 스핀 코팅은 3000rpm으로 설정하고 회전하면서 MoS_2 증착용 용액 20 L를 적하하였다. 스핀 코팅 공정 시간은 60초로 진행하였고, 공정 후의 모든 웨이퍼는 150℃에서 30분 동안 건조하였다. 건조된 웨이퍼는 완전한 MoS_2 증착을 위해 열처리되었다. 열처리 설정 온도는800℃로 진행하여, 열처리를 완료하는 것으로 공정을 마쳤다. MoS_2 코팅 웨이퍼에 셀공정을 수행하였다.

태양전지 제조공정은 반사방지막 층인 SiN_x 층을 PECVD 장비를 통해 증착시킨 후 전극 형성을 위해 스크린 프린팅 방법으로 전극을 형성하였다. PECVD장비의 레시피 조건은 다음과 같다. RF의 경우 200 W로 최대 400℃의 온도에서, N2 가스를 400 sccm로 진행하였다. NH3:SiH4의 비율은 30:15로 하여 110 초 동안 진행하였고 그 결과 약 70~80 nm의 SiN_x층이 생성되었다. 반사방지막의 역할을 하는 SiN_x층까지 웨이퍼에 올려진 후 전극 형성을 위해 스크린 프린팅 방법으로 전극을 형성하였다. Ag의 전면 스크린 프린팅과 드라이를 진행하고, Al의 후면 스크린 프

린팅과 드라이를 진행하였다. 건조 과정후 마지막으로 cofiring을 진행하여 소성로에서 전극이 웨이퍼에 오믹접촉된 태양전지 cell을 완성하였다. 마지막으로 제작된 MoS_2박막층의 구조적 FESEM, CsTEM, Raman 특성과 제작된 셀의 전기적 광학적 특성을 확인하기 위하여 I-V 그래프와 QE, PR을 측정하여 효율을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 FE-SEM Analysis

Fig. 2의 (a)는 15분 동안 $(NH_4)_2MoS_4$ 전구체 용액을 사용하여 딥 코팅한 후 미세 조직화된 np-Si 기판에 증착된 MoS_2 층의 FESEM 이미지를 보여준다. Fig. 2의 (a1)는 마이크로 텍스쳐링 공정 후 딥 코팅을 이용한 MoS_2 증착을 진행한 뒤 찍은 이미지로 마이크로 피라미드와 증착된 MoS_2를 확인할 수 있다. Fig. 2의 (a2)의 경우 750℃로 열처리한 이미지이며 열처리를 하지 않은 (a1)과 비교해 피라미드 사이의 증착된 MoS_2의 상태가 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 2의 (b)는 나노 텍스쳐링 된 np-Si 기판에 스핀 코팅 방식으로 증착된 MoS_2 층의 FESEM 이미지를 보여준다. (b1)는 MoS_2 층이 증착되기 전 나노 텍스쳐링 된 np-Si 기판의 평면도이다. 마이크로 피라미드가 있는 것은 (a)와 동일하나 무수한 주름결이 새겨져 있는 나노 텍스쳐링된 표면을 확인할 수 있다. 이 상태에서 스핀 코팅 방식으로 MoS_2 층을 증착하고 800℃에서 열처리를 한 이미지가 Fig. 2의 (b2)의 평면도이다. 나노 텍스쳐링 기판 위에 3000 rpm으로 60 초 동안 스핀 코팅을 진행하여 MoS_2 층을 증착시켰고 800℃라는 고온에서 열처리를 하였기에 나노 텍스쳐링 특유의 주름진 피라미드 형상이 보이지 않지만 피라미드 형상이 어느 정도 남아있음을 육안으로 확인하였다.

증착된 MoS_2층의 두께를 비롯해 미세 균열 등의 상태는 전구체 용액의 농도와 온도에 따라 달라진다는 것을 확인할 수 있다.[9] 증착된 상태의 층은 표면 거칠기와 결정질의 상태가 낮음을 나타내며 이로 인하여 미세 균열이 발생한다. MoS_2 의 구조적 결정화는 온도를 750℃로 증가시키면 개선될 수 있다.[10] 750℃의 온도에서 열처리된 MoS_2/np-Si 샘플은 미세 균열 없이 MoS_2의 얇고 균일한 층을 보여주는 반면, 단순히 딥 코팅으로 증착된 샘플은 훨씬 더 큰 변화를 보여준다. 마이크로 피라미드 주변에서 일어난 미세 균열과 표면 거칠기가 열처리를 하지 않은 샘플에서 더 크게 나타났음을 확인하였다. 구조적 특성은 Cs-TEM 분석에 의해 추가로 특성을 확인하였다.

3.2 Cs-TEM Analysis

Fig. 3은 MoS_2 박막층의 Cs-TEM 측정 이미지이다. Fig. 3의 (a)는 딥 코팅 공정에 의해 성장된 MoS_2 층과 Si 격자면의 단면도를 순차적으로 보여준다. SiN_x/a-Si(n)/MoS_2/micro-np-Si 구조의 태양전지 셀 샘플의 단면 고해상도이다. Fig. 3 (a2)의 경우 순차적으로 증착된 층의 구조 중 MoS_2 층을 중점적으로 확인한 이미지이며, 나노두께로 얇게 증착된 MoS_2 층은 비정질 구조를 이루고 있음을 확인하였다. Fig. 3의 (b)는 나노 텍스쳐링 진행 후 스핀 코팅 공정에 의해 성장된 MoS_2 층과 격자면의 단면도를 보여준다. Fig. 3 (b)의 MoS_2/nano-np-Si 샘플의 단면 고해상도 Cs-TEM 이미지를 확인하면 스핀 코팅 공정을 통한 MoS_2/nano-np-Si 샘플도 Fig. 3의 (a)와 같이 순차적으로 나노 층이 증착된 구조라는 것을 확인하였다. 이는 Fig. 3 (b1)에서 명확하게 확인되었다. 또한 Fig. 3 (b2)의 MoS_2 층을 더 자세하게 확대된 이미지를 통하여 MoS_2 층이 불연속적인 결정 구조를 이루고 있다는 것을 확인하였다.

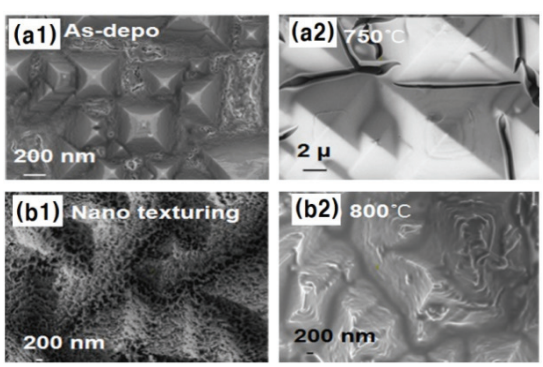

Fig. 2. FE-SEM images of MoS_2/np-Si samples prepared by dipping method: (a1) as-deposited and (a2) the annealed ones, and by spin coating method: (b1) as-deposited and (b2) annealed ones.

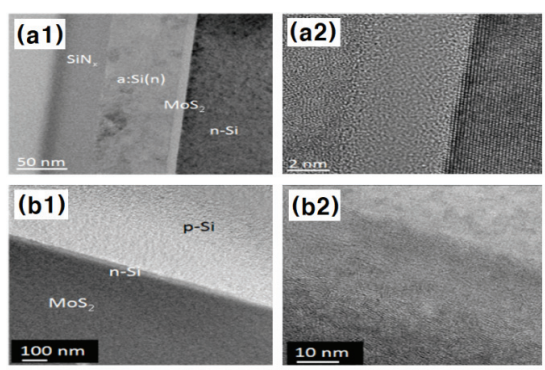

Fig. 3. Cs-TEM images on (a1, a2) SiN_x/a-Si(n)/MoS_2/micro-np-Si sample prepared by dipping method and (b1,b2) MoS_2/nano-np-Si sample by spin-coating method.

용액에 담그는 방식인 딥 코팅 방법은 MoS_2층을 형성하였지만 비정질 구조를 보인다. 2단계 열처리 공정을 수행한 경우로서 1단계 공정 온도가 450℃ 이하에서 수행하였다. 증착된 MoS_2 박막층의 결정성장은 Mo와 S 원소의 미시적인 확산공정에 의해 수행되어지며 대략적으로 600℃가 적절하다. [11] 스핀 코팅 방법은 MoS_2층이 나노시트 형태로 불연속적인 나노다결정 형태를 형성하였다. 스핀 코팅방식은 용액의 농도와 회전 속도를 변경하여 전구체 필름 두께를 제어할 수 있다.[12] 스핀 코팅으로 MoS_2층을 올린 뒤 150℃의 Drying 과정을 거쳐 Annealing 과정을 진행하였다. MoS2층의 구조적 결정성은 열처리 과정 시 온도를 증가시키는 것으로 결정성을 개선할 수 있기에 이 실험에서 열처리 과정은 800℃에서 이루어졌다.[10]

3.3 EDX, Raman, PR, and QE Analyses

Fig. 4에서는 MoS_2 샘플이 가지는 구조적 특성의 성분 분석과 광학적 특성을 보고자 한다. Fig. 4의 (a)는 나노 텍스쳐링 후 스핀 코팅으로 MoS_2를 증착한 샘플의 EDX 이미지이다. 정확한 성분 분석을 통해 왼쪽에서 약 100 nm 정도의 두께로 Si 성분이 나타났으며, 중간의 흰 띠 부분에서 약 50 nm 두께의 MoS_2가 나타나는 것을 확인하였다. 성분 분석으로도 스핀 코팅한 MoS_2층이 nano-np-Si 층 위에 제대로 증착되었다는 것을 확인하였다. 또한 MoS_2 Raman 분석으로 결정구조에 대해 확인하였다.

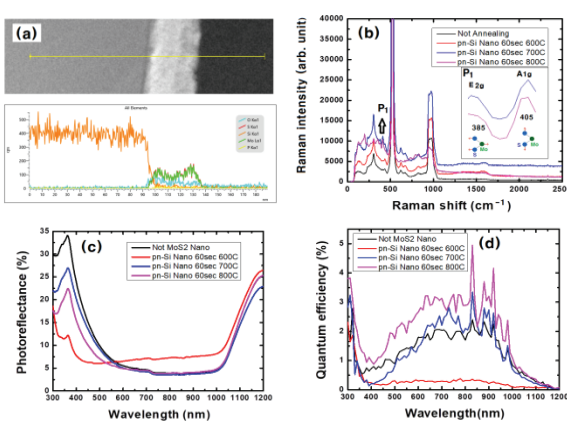

Fig. 4. (a) EDX image on the MoS_2 sample, (b) Raman spectra of the MoS_2 sample, (c) photoreflectances on the SiN_x/MoS_2/nano-np-Si samples, and (d) quantum efficiencies on the SiN_x/MoS_2/nano-np-Si samples.

Fig. 4 (b)는 나노 텍스쳐링 기판에 스핀 코팅 공정을 진행한 MoS_2/nano-np-Si 샘플의 Raman spectra이다. 열처리하지 않은 시료와 600°C, 700°C, 800°C에서 수행한 시료를 비교하였다. 열처리하지 않은 시료의 Raman shift피크인 303 cm^{-1}가 800°C 샘플에서는 줄어드는 현상을 보였다. 또한 385 cm^{-1}와 405 cm^{-1}에서의 피크가 700°C와 800°C 시료에서 형성되어 나타난다. 실리콘의 경우, Raman shift가 521 cm^{-1}에서 형성되며 이보다 작은 값은 비정질 특성이다. MoS_2의 경우, 385cm^{-1}의 E2g 진동모드와 405cm^{-1}의 A1g 진동모드이라는 두 가지 특징모드를 갖는다.[13] E2g 진동모드는 in-plane 진동이고 A1g 진동모드 out-of-plane 진동으로 MoS_2 층의 숫자가 증가할수록 차이가 커진다. 이를 통하여 700~800°C 열처리 온도가 결정구조를 형성함을 확인하였다.

이렇게 만들어진 나노 텍스쳐링 이후 스핀 코팅된 MoS_2나노층을 Si 태양전지 제조에 사용하였으며, 제조된 전지의 광학적 특성을 분석하여 PR과 QE를 확인하였다. Fig. 4의 (c) 는 300~1200 nm의 파장 범위에서 측정된 나노 텍스쳐링 이후 스핀 코팅 공정한 SiN_x/MoS_2/nano-np-Si 태양전지의 광반사율 특성이다. MoS_2 박막층의 열처리 온도에 따른 제작된 태양전지의 광반사율은 박막 열처리를 수행하지 않은 시료와 700℃, 800℃에서 수행한 시료에서는 가시광영역에서 차이가 없다. 또한 온도가 상승할수록 363 nm의 자외선 영역의 광반사율이 감소되었다. 하지만 600℃ 시료에서는 가시광선 영역에서 광반사율이 상승하였으며, 363 nm 의 자외선영역에서는 광반사율이 크게 감소되었다. MoS_2층의 에너지 밴드는 광흡수 밴드가 가시광선 영역인 1.85(670)와 2.05 eV (604 nm)이다.[14] 이는 Brillouin zone의 K 점에서 광학적 천이의 직접 밴드에 기인한다. 하지만 자외선 영역의 흡수율 증가는 MoS_2 층의 나노구조나 화학적인 결함에서의 광흡수와 관련이 있다.[15]

Fig. 4의 (d)는 SiN_x/MoS_2/nano-np-Si 이종 구조 Si 태양 전지의 양자효율이다. MoS_2 층이 없는 나노 기준 셀은 2% 대의 양자효율을 보였다. MoS_2 층이 삽입되어진 셀은 열처리온도에 따라 양자효율 특성이 크게 달라졌다. MoS_2 층을600℃로 열처리하여 제작된 셀은 양자효율이 0.5% 이하로 크게 줄어든 반면, 700℃와 800℃ 로 처리하여 제작된 셀은 기준셀보다도 증가된 양자효율을 보였다. 특히 800℃로 제작된 셀은 3%이상의 양자효율을 보였다. 또한 1.5(830), 1.34(920), 1.26 eV (980 nm) 에너지대에서 양자효율이 상승하는 피크현상을 보였다. 양자효율 측정에서 입사된 광이 전자와 정공쌍인 엑시톤상태를 만들어 전자와 정공을 분리하여 이동시켜 전하운반자로서 광전류를 측정하는 경우이다. 실리콘 밴드에서의 엑시톤에 의한 광전류와 MoS_2 나노층에서의 광전류 변환이 추가적으로 작용하게 된다. 에너지 밴드의 복잡한 구조로 인해, 밴드내에서 엑시톤이 낮은 에너지로 이완되고, 가파른 밴드로 인해 운반자의 수명이 매우 짧아 재결합하여 소멸할 수 있다.[16] 단일광자 발광여기 분광법(one-photon photoluminescence

excitation (PLE) spectroscopy) 에서, MoS_2 단일층은 평균적인 2.24 (553)와 2.34 eV (530 nm) 에너지를 갖는다. MoS_2 층이 실리콘층과의 계면을 형성하여 가시광 영역과 근적외선 영역에서의 운반자 수명을 향상시키고 재결합율을 저감하는 효과를 보였다.

3.4 I-V 그래프

Fig. 5는 딥 코팅 공정을 수행한 SiN_x/a-Si(n)/MoS_2/micro-np-Si 이종 구조 태양전지와 스핀 코팅 공정을 수행한 SiN_x/MoS_2/nano-np-Si 이종 구조 태양 전지의 전류-전압 특성이다. 또한 제작된 태양전지의 광기전력 매개변수는 Table 1 과 2에 각각 나타내었다. 딥 코팅공정으로 수행된 MoS_2 층을 포함하는 셀 들에서는 MoS_2 층을 200-700℃에서 열처리한 셀이 개방회로전압(V_{oc}) 이 0.467 V, 단락전류(I_{sc})가 3.576 A, 직렬저항(R_s)이 0.0004 Ω, 병렬저항(R_{sh}) 이 2.08 Ω 그리고 곡선인자(FF)는 72.46%이고 변환효율은 5.06 %의 최대효율을 나타냈다. 스핀 코팅공정으로 수행된 MoS_2 층을 포함하는 셀 들에서는 MoS_2 층을 700℃에서 열처리한 셀이 V_{oc} 이 0.513 V, I_{sc}가 4.195 A, R_s가 0.111 Ω, R_{sh} 이 0.16 Ω 그리고 FF는 27.83%이고 변환효율은 2.56%의 최대치를 나타냈다.

MoS_2 층을 제작하는 딥 코팅과 스핀 코팅 2가지 방식에 대해서 효율의 차이가 있으며, 열처리온도에서는 두 방식 모두 700℃ 셀이 최대의 효율을 보였다. 특히 나노 텍스쳐링된 기판위에 제작된 셀의 경우 MoS_2 층을 증착한 경우가 기준시료대비 모두 적은 효율을 보였다. 이는 전하밀도가 상승하는 나노구조에서 S가 결핍된 MoS_2 층이 n형 전도도를 보이지만 실리콘 계면에서의 공간전하에 의한 포획으로 인해 재결합율이 증가됨을 알 수 있다.[17]

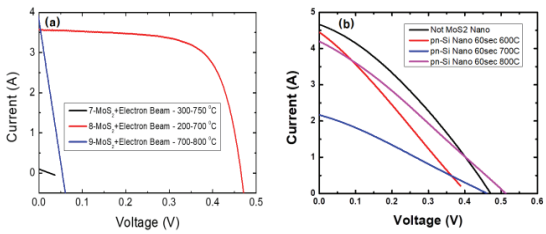

Fig. 5. I-V measurements of (a) SiN_x/a-Si(n)/MoS_2/micro-np-Si solar cells and SiN_x/MoS_2/nano-np-Si solar cells.

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 태양전지 응용을 위한 MoS_2박막층을 열분해 방식으로 수행하였다. 먼저 마이크로 텍스쳐링된 np-Si 기판과 나노 텍스쳐링된 np-Si 기판을 제작하였다. 또한 $(NH_4)_2MoS_4$ 전구체를 사용하여 MoS_2증착용 용액을 제작하였으며, 용액에 담그는 딥 코팅 방식과 스핀코터를 이용한 스핀 코팅 방식으로 필름층을 증착하여 건조와 열처릴 통해 MoS_2박막 층을 확보하였으며, FESEM, CsTEM, EDX, Raman등 구조적 물성을 파악하였다. MoS_2박막층이 열처리과정을 통해 결정상의 형성을 확인하였다. 확보된 박막층 사양을 실리콘 태양전지에 적용하였다. 마이크로 텍스쳐링 이후 딥 코팅된 SiN_x/a-Si(n)/MoS_2/micro-np-Si 이종 접합 구조의 태양전지는 오믹접촉 되어 단락 전류 I_{sc} = 3.576 A 및 효율 5.06%의 태양전지를 제작하였다. 또한 나노 텍스쳐링 이후 스핀 코팅 된 SiN_x/MoS_2/nano-np-Si 이종 접합 구조의 태양전지도 오믹접촉 되어 단락 전류 I_{sc} = 4.195 A 및 효율 2.56%의 태양전지를 제작하였다. 이를 통하여 S가 결핍된 MoS_2박막 층이 실리콘 태양 전지 구조에 호환적인 특성을 보이며 새로운 가능성을 확인하였다.

Table 1. Photovoltaic parameters of SiNx/a-Si(n)/MoS2/micro-np-Si heterostructure Si solar cells .

cell	η [%]	FF [%]	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	R_s [Ohm]	R_{sh} [Ohm]
Sample-7 300-750°C	1.26	18.80	1.023	0.053	0.0049	0.08
Sample-8 200-700°C	5.06	72.46	3.576	0.467	0.0004	2.08
Sample-9 400-800°C	2.86	26.21	3.983	0.656	0.0005	0.07

Table 2. Photovoltaic parameters of SiN_x/MoS_2/nano-np-Si heterostructure Si solar cells

cell	η [%]	FF [%]	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	R_s [Ohm]	R_{sh} [Ohm]
나노 텍스쳐링 np-Si	3.02	32.2	4.660	0.471	0.0705	0.18
SiN_x/MoS_2/np-Si 600°C	2.09	28.60	4.447	0.384	0.0871	0.11
SiN_x/MoS_2/np-Si 700°C	2.56	27.83	4.194	0.513	0.1112	0.16
SiN_x/MoS_2/np-Si 800°C	1.16	27.82	2.170	0.451	0.2041	0.27

감사의 글

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2019R1F 1A1060102). This work was also supported by the 2022-2023 project of Jeonbuk National University.

참고문헌

1. Wang, L., Tang, J., and Huang, Q. A. “Gamma and electron beam irradiation effects on the resistance of micromachined polycrystalline silicon beams.” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 177, pp. 99-104, (2012).
2. Tahersima, M. H., and Sorger, V. J. “Enhanced photon absorption in spiral nanostructured solar cells using layered 2D materials.” Nanotechnology, Vol. 26(34), p. 344005, (2015).
3. Furchi, M. M., Höller, F., Dobusch, L., Polyushkin, D. K., Schuler, S., and Mueller, T. “Device physics of van der Waals heterojunction solar cells.” npj 2D Materials and Applications, Vol 2(1), p. 3, (2018).
4. Liu, Y., Hao, L., Gao, W., Xue, Q., Guo, W., Wu, Z., ... and Zhang, W. “Electrical characterization and ammonia sensing properties of MoS_2/Si p–n junction.” Journal of Alloys and Compounds, Vol. 631, pp. 105-110, (2015).
5. Richter, A., Benick, J., Müller, R., Feldmann, F., Reichel, C., Hermle, M., and Glunz, S. W. “Tunnel oxide passivating electron contacts as full‐area rear emitter of high‐efficiency p‐type silicon solar cells.” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 26(8), pp. 579-586, (2018).
6. Liu, K. K., Zhang, W., Lee, Y. H., Lin, Y. C., Chang, M. T., Su, C. Y., ... and Li, L. J. “Growth of large-area and highly crystalline MoS2 thin layers on insulating substrates.” Nano letters, Vol. 12(3), pp. 1538-1544, (2012).
7. Tsai, D. S., Liu, K. K., Lien, D. H., Tsai, M. L., Kang, C. F., Lin, C. A., ... and He, J. H., “Few-layer MoS_2 with high broadband photogain and fast optical switching for use in harsh environments.” Acs Nano, Vol. 7(5), pp. 3905-3911, (2013).
8. Park, H., Lee, J. S., Lim, H. J., Kim, D., Kwon, S., and Yoon, S. “The effect of tertiary-butyl alcohol on the texturing of crystalline silicon solar cells.” Journal of the Korean Physical Society, Vol. 55(5 PART 1), pp. 1767-1771, (2009).
9. Hossain, M. A., Merzougui, B. A., Alharbi, F. H., and Tabet, N. “Electrochemical deposition of bulk MoS2 thin films for photovoltaic applications.” Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 186, pp. 165-174, (2018).
10. Akbarzadeh, M., Zandrahimi, M., and Moradpour, E. “Molybdenum Disulfide (MoS_2) Coating on AISI 316 Stainless Steel by Thermodiffusion Method.” Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 62, (2017).
11. Fei, L., Lei, S., Zhang, W. B., Lu, W., Lin, Z., Lam, C. H., ... and Wang, Y. “Direct TEM observations of growth mechanisms of two-dimensional MoS_2 flakes.” Nature communications, Vol. 7(1), p. 12206, (2016).
12. Park, S. W., Jo, Y. J., Bae, S., Hong, B. H., and Lee, S. K. “Synthesis of Large-Scale Transition Metal Dichalcogenides for Their Commercialization.” Applied Science and Convergence Technology, Vol. 29(6), pp. 133-142, (2020).
13. Pei, J., Yang, J., Xu, R., Zeng, Y. H., Myint, Y. W., Zhang, S., ... and Lu, Y. “Exciton and trion dynamics in bilayer MoS2.” Small, Vol. 11(48), pp. 6384-6390, (2015).
14. Dybała, F., Polak, M. P., Kopaczek, J., Scharoch, P., Wu, K., Tongay, S., and Kudrawiec, R. “Pressure coefficients for direct optical transitions in MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, and WSe_2 crystals and semiconductor to metal transitions.” Scientific reports, Vol. 6(1), p. 26663, (2016).
15. Satha, S., Sahu, R., Mun, J., and Kim, K. “Thermolytic Deposition of MoS_2 Nanolayer for Si Solar Cell Applications.” physica status solidi (a), Vol. 217(12), p. 1900993, (2020).
16. Hill, H. M., Rigosi, A. F., Roquelet, C., Chernikov, A., Berkelbach, T. C., Reichman, D. R., ... and Heinz, T. F. “Observation of excitonic Rydberg states in monolayer MoS_2 and WS_2 by photoluminescence excitation spectroscopy.” Nano letters, Vol. 15(5), pp. 2992-2997, (2015).
17. Mukherjee, S., Maiti, R., Katiyar, A. K., Das, S., and Ray, S. K. “Novel colloidal MoS_2 quantum dot heterojunctions on silicon platforms for multifunctional optoelectronic devices.” Scientific reports, Vol. 6(1), p. 29016, (2016).

접수일: 2023년 8월 3일, 심사일: 2023년 9월 6일,
게재확정일: 2023년 9월 6일