

이종접합 실리콘 태양전지의 효율 개선을 위한 열처리의 효과

박형기¹ ID, 이준신² ID

¹ 군산대학교 기초과학연구소

² 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Effect on the Thermal Treatment for Improving Efficiency in Silicon Heterojunction Solar Cells

Hyeong Gi Park¹ and Junsin Yi²

¹ The Institute of Basic Science, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

² College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received May 3, 2024; Revised May 16, 2024; Accepted May 16, 2024)

Abstract: This study investigates the post-thermal treatment effects on the efficiency of silicon heterojunction solar cells, specifically examining the influence of annealing on p-type microcrystalline silicon oxide and ITO thin films. By assessing changes in carrier concentration, mobility, resistivity, transmittance, and optical bandgap, we identified conditions that optimize these properties. Results reveal that appropriate annealing significantly enhances the fill factor and current density, leading to a notable improvement in overall solar cell efficiency. This research advances our understanding of thermal processing in silicon-based photovoltaics and provides valuable insights into the optimization of production techniques to maximize the performance of solar cells.

Keywords: Microcrystalline silicon oxide, SHJ solar cells, ITO film, Magnetron sputtering, Thermal annealing

실리콘 흡수층이 광을 흡수하여 전기로 변환하는 것을 태양전지라고 부르는데 그중 결정질 실리콘(crystalline silicon, c-Si)에 수소화된 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H)으로 형성한 태양전지는 이종접합 실리콘 태양전지라 부르며 광전환에 따른 에너지 손실을 최소화하는 구조로 실리콘 계열에서 가장 높은 효율로 이론적 한계치는 29.7%로 보고되었다 [1-5]. 실리콘 이종접합 태양전지는 그림 1과 같이 도핑하지 않은 a-Si:H를 c-Si 기판 양면에 증착하여 passivation을 통해 계면

의 결함 및 에너지 밴드갭 불연속성이 감소함에 따라 개방 전압이 향상된다 [6]. 그 위에 B₂H₆ 및 PH₄를 매개로 하는 도핑 소스로 p형 및 n형이 형성된 a-Si:H를 전면 및 후면에 각각 증착하고 DC 혹은 RF magnetron sputtering을 이용해 투명전도산화막(transparent conductive oxide, TCO)을 양면에 증착하고 전면 및 후면은 그리드 전극을 스크린 인쇄기를 이용하여 저온으로 소성하는 과정을 통해 제작한다. 실리콘 이종접합(silicon heterojunction, SHJ) 태양전지의 효율 향상을 위한 연구는 활발히 진행되고 있으며 비정질 실리콘 박막의 표면 passivation 효과에 따른 재결합 손실 감소를 통한 개방전압 개선, 도핑된 비정질 실리콘 박막의 낮은 광 흡수를 통한 전류밀도 개선, 투명전도산화막의 높은 투과도 및 전도도를 통한 전류밀도 개선 및

✉ Hyeong Gi Park; hspark007@gmail.com
Junsin Yi; 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.

충진율(fill factor, FF) 향상, 전면 그리드 전극의 좁은 폭과 높은 종횡 비, 투명전도산화막과의 낮은 접촉저항을 위한 최적화된 피치에 따른 전류밀도와 FF 향상 등이 영향을 주는 주요 인자다 [7-11]. 앞서 나열한 내용의 공통점은 SHJ 태양전지의 전류밀도 및 FF 개선에 관한 것으로 최근에 $\mu\text{c-SiO:H}$, nc-Si:H 와 함께 W, Mo, Ti, Zr 및 Ga이 도핑소재가 포함된 In_2O_3 (IMO:H) 소재를 활용한 실리콘 이종접합 태양전지로 23.81%로 전류밀도 및 FF를 개선했다고 보고하였다. 이렇듯 실리콘 이종접합 태양전지의 전면층은 광학적 특성의 이득과 전기적 특성 개선이 이들 인자 개선에 영향이 있음을 시사하는 것이다.

전면층은 실리콘 이종접합 태양전지에서 중요한 요소로 p-type 미세결정질 실리콘 박막은 높은 전도도, 낮은 활성화 에너지 및 낮은 흡수도를 나타내는데 언급된 특성을 최적화하려면 높은 결정화도와 낮은 결함 밀도가 필수적이다 [12]. 하지만 비정질 실리콘 산화막은 두께에 따른 특성 변화가 비교적 적으나 미세결정질 실리콘 산화막은 먼저 비정질 상태로의 성장 이후 결정성 성장으로 이어지기 때문에 두께에 따라 박막의 특성이 크게 달라진다. 특히 p층은 흡수를 최소화하기 위해 몇 nm 두께의 매우 얇은 박막을 사용하는데, 높은 결정화를 달성하기가 매우 어렵다. 또한, 도핑 원소인 boron이 함유됨으로써 결정화를 억제하는 효과가 있어 얇은 박막에서 결정화가 더욱 어려워진다 [13]. 이러한 문제를 해결하기 위해 p-type 미세결정질 실

리콘 산화막의 결정화도와 결함 밀도에 미치는 열처리 효과를 연구하고자 한다. 또한, ITO 박막 증착에 따른 열처리 효과 분위기 및 온도에 따른 영향을 조사하여 실리콘 이종접합 태양전지의 효율 향상에 기여하고자 한다.

PECVD를 이용해 p-type의 $\mu\text{c-SiO:H}$ 를 증착하는 데 조건은 13.56 MHz의 RF power로 SiH_4 , H_2 , CO_2 및 B_2H_6 가스를 각각 5 sccm, 900 sccm, 2.1 sccm, 0.3 sccm 유량으로 했으며 CO_2 가스는 산화막의 산소공급원, boron 함유는 결정화를 억제하는 것을 방지하기 위해 B_2H_6 의 유량을 0.3 sccm으로 사용하였다 (표 1). Power density, 기판 온도 및 작동 압력은 각각 14 mW/cm^2 , 200°C 및 100 mTorr로 진행하였다. ITO는 SnO_2 10 wt%가 함유된 순도 99.999% 13-inch target을 사용했고, RF/DC power는 ITO target이 커짐에 따라 plasma가 ignition 될 때 면적당 받는 damage와 그에 따른 기판 온도 상승을 고려하여 500 W에서 진행되었고 기판 온도는 glass TC를 사용하여 실측 온도 180°C 에서 진행되었다. 기본 진공은 1.12×10^{-5} Torr까지 도달한 다음, 작동 압력 1.5 mTorr에서 타겟 표면의 오염 및 활성화에 따른 안정적 증착을 위해 pre-sputtering을 20분간 진행하였다. 증착 시 shadow mask를 이용해 patterning 했는데 reactive sputtering 하지 않고 Ar 가스를 30 sccm으로 흘렸으며 전면 및 후면 ITO의 두께는 80 nm, 100 nm 각각 증착하였다. 관련된 공정 조건은 표 2에 나타났다.

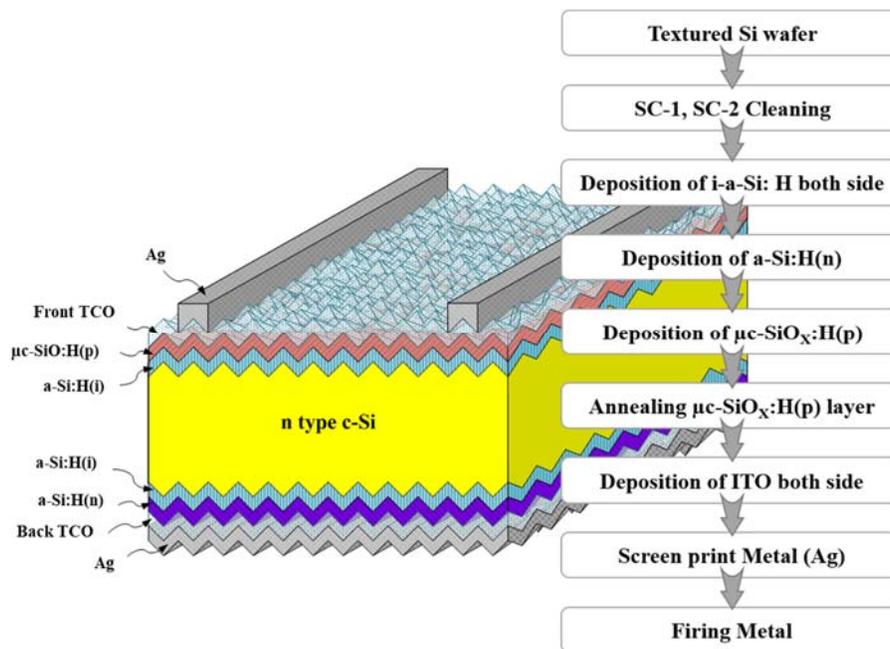


Fig. 1. Schematic of structure and fabrication process in silicon heterojunction (SHJ) solar cells.

Table 1. Conditions of p-type $\mu\text{-SiO:H}$ deposition by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD).

SiH ₄	Gas flow (sccm)			Power density (mW/cm ²)	Temperature (°C)	Pressure (mTorr)
	H ₂	CO ₂	B ₂ H ₆			
5	900	2.1	0.3	14	200	100

Table 2. Deposition conditions of ITO magnetron sputtering by RF/DC power source.

Parameter	Value
Ar gas flow	30 sccm
Substrate-target distance	7 cm
RF/DC power	500 W
Substrate temperature	180°C
Base pressure	1.12×10 ⁻⁵ Torr
Working pressure	1.5 mTorr
Duty cycle	30%

비저항 1~2 Ω·cm, 150 μm 두께의 n-type c-Si wafer는 saw damage remove 및 texturing이 이미 진행된 기판을 사용하였고, 태양전지를 제작하기에 앞서 기판의 pre-cleaning을 실시하는데 아세톤, isopropyl alcohol (IPA) 및 deionized water (DIW)를 초음파 세척기를 통해 기판의 오염물을 제거하고 일반적으로 알려진 RCA (radio corporation of america) cleaning은 반도체 제조과정에서 고온 공정을 진행에 앞서 세정공정을 위한 것으로 wafer 표면에 원치 않은 물질 혹은 오염물을 제거하는 공정을 말한다. 세정공정은 RCA1, RCA2로 진행되며 RCA1는 DIW:NH₄OH 용액을 5:1 비율로 혼합하고 가열을 진행한 후, 70°C에 도달하면 H₂O₂ 용액을 1의 비율로 혼합한다. 이후 시료를 넣고 15분간 처리한다. RCA1 처리가 끝나면 DIW로 세정 후 RCA2를 계속적으로 진행하는데 RCA2는 DIW와 HCl용액을 6:1의 비율로 혼합하여 70°C까지 가열한다. 70°C에 도달하면 H₂O₂ 용액을 혼합하여 시료를 넣고 10분간 처리한다 [14]. Cleaning이 완료되면 HF 1% 용액에 약 30초간 시료를 담그고 나서 시료를 챔버에 넣어 진행하는데 이는 표면상의 결함인 dangling bond에 수소에 의한 처리와 자연산화막을 제거하는 효과 때문에 실시한다 [15]. 이후 다중 클러스터 플라즈마 화학 기상 증착 장비(multi-cluster plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)를 이용해 intrinsic a-Si:H 박막을 전·후면에 증착하였는데 이중 접합 태양전지용 c-Si

기판 표면의 defect을 크게 감소시켜 누설 전류를 줄임으로써 개방전압을 증가시키는 중요한 역할을 한다. 이때, SiH₄:H₂ 가스비는 1:5이며 plasma density는 30 mW/cm², 증착 온도는 200°C, 공정 압력은 100 mTorr에서 진행하였다. n층 증착은 후면에 back surface field (BSF)층을 형성하여 높은 개방전압과 낮은 후면 재결합 속도를 형성하여 고효율의 이중접합 태양전지를 제작할 수 있으며, 이번 실험에서는 최적화된 n-type a-Si:H 박막을 사용한다. 증착은 RF Power (13.56 MHz) PECVD로 증착하고 가스비는 SiH₄:H₂:PH₃ (1%)=5:45:5의 도핑농도 1%를 가진다. 파워는 30 mW/cm², 증착 온도는 200°C, 압력은 200 mTorr에서 증착을 진행하였다. 이후 p층을 증착하는데 앞서 설명과 함께 표 1에 자세하게 작성해 놨다. ITO 박막은 전면 80 nm, 후면 100 nm를 각각 magnetron sputtering을 이용해 증착하며 metallization은 screen printing법으로 진행한다. 그러나 재료의 열적 손상에 의해 온도에 민감한 탓에 이중접합 태양전지에 적합한 저온 Ag paste를 사용하는데 선폭 45 μm, 간격 1.31 mm의 screen mesh를 사용하였다. Screen mesh flame과 인쇄물 간의 거리의 snap-off는 1.3 mm, squeeze 각도, 속도 그리고 압력은 각각 22.5°, 40 mm/sec, 0.2 MPa로 고정해서 진행하였다. 전면 Ag 전극 형성 및 후면은 full pattern printing을 진행하였다. Belt furnace 150°C 조건으로 20분간 경화를 실시하는데 cell 크기는 4×4 cm², active cell area는 ITO 증착 시 shadow mask로 define했다. 다양한 온도에서 열처리하는 실험은 rapid thermal annealing (RTA) 장비에서 실시하였는데 rotary pump로 저진공 10⁻³ Torr를 확보하면 이후 열처리 온도가 setting 온도에 도달할 때까지 기다린 후, 온도에 도달하면 30분 동안 열처리를 진행한다. 열처리가 완료된 다음 setting 온도의 전원을 끄고 상온으로 식을 때까지 기다리게 되면 열처리 공정은 완료하는 것이다. UV-visible spectrophotometer는 ITO 박막의 투과도를 측정하는데 bare glass에 증착된 ITO를 300~1,100 nm의 영역에서 측정했으며 이후 Tauc plot 공식으로 optical bandgap을 도출했다. Spectroscopic ellipsometry는 증착 박막의 두께 측정 및 증착율을 확인하는 데 활용했으며 캐리어

농도, 이동도 및 비저항 특성은 hall-effect measurement system으로 분석하였다. 다양한 온도에서 열처리한 p-type $\mu\text{c-SiO:H}$ 을 라만 분광 분석 장비를 통해 진행했으며 도핑하지 않은 비정질 실리콘을 textured c-Si 기판 양면에 증착하며 이후 p-type $\mu\text{c-SiO:H}$ 을 양면에 증착했고 이후 다양한 온도로 열처리한 시료를 이용해 QSSPC에서 소수 캐리어 수명 시간(minority carrier lifetime, MCLT)과 implied V_{oc} 를 측정하고 분석하였다. 아울러 최적화된 조건을 바탕으로 그림 1에서와 같이 제작된 실리콘 이중접합 태양전지를 이용해 100 mW/cm^2 의 조건하에서 전류-전압특성 장치를 이용해 태양전지의 변환 효율을 측정하고 분석하였다.

그림 2는 다양한 온도에서 열처리한 p-type $\mu\text{c-SiO:H}$ 을 라만 분광 분석을 통해 확인한 결과로 온도가 증가함에 따라 peak intensity가 감소하며, 폭 또한 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 실리콘 산화막 내의 산소 함량이 증가하고 이로 인해 구조적 변화가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 변화는 결정 격자 내의 불규칙성을 증가시켜 phonon의 평균 자유 경로가 짧아지는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 라만 peak의 폭이 넓어지는 원인이 되며 phonon 충돌의 빈도가 높아져 피크의 강도가 감소하는 것이다. 내부 응력의 증가 역시 앞서 설명한 바와 같다고 해석할 수 있다. 이러한 모든 것이 아무래도 결정 크기의 감소에 따라 피크의 파수가 상승하는 현상이기 때문에 응력의 영향을 무시할 수 없으며 실리콘과 실리콘 산화물 사이의 열팽창 계수 차이는 열처리 공정 중 발생할 수 있다. 결

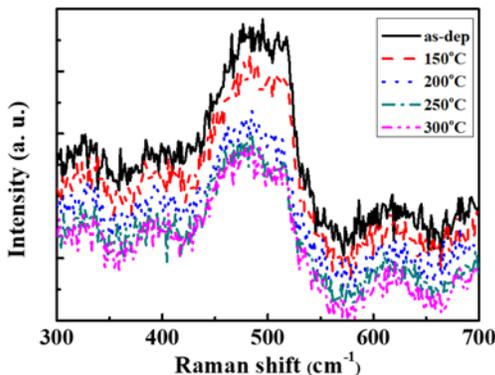


Fig. 2. Raman spectroscopy results for p-type hydrogenated microcrystalline silicon oxide ($\mu\text{c-SiO:H}$) annealed at different temperatures [the X-axis represents the Raman shift measured in wavenumbers (cm^{-1}), while the Y-axis indicates the intensity of the Raman scattering. Samples were annealed at 100°C , 200°C , and 300°C , respectively, to assess the effects of thermal treatment on the structural properties of the material].

론적으로 열처리가 진행됨에 따라 광 흡수의 임계 에너지가 증가하고, 이는 흡수 계수의 감소로 이어진다.

위 결과를 바탕으로 그림 3은 실리콘 산화막의 열처리 공정의 온도에 따른 패시베이션 효과에 미치는 영향을 평가하고자 minority carrier lifetime을 측정한 결과를 보여주고 있다. 150°C 에서 열처리된 시료는 $803 \mu\text{sec}$ 의 minority carrier lifetime이 관찰되었는데 이는 열처리 전($747 \mu\text{sec}$)에 비해 개선된 것을 알 수 있으며 implied V_{oc} 는 거의 변화가 없음을 확인하였다. 그러나 온도가 증가함에 따라 특성이 저하하는 열화가 관찰되었는데 250°C 부터 $384 \mu\text{sec}$ 및 300°C 에서 $148 \mu\text{sec}$ 까지 급격하게 감소하는 것을 관찰하였다. 제시된 minority carrier lifetime과 implied V_{oc} 가 감소하는 원인은 높은 온도에서 a-Si:H(i) 및 p-type $\mu\text{c-SiO:H}$ 층 내부의 결함이 증가한 것으로 반도체 내부에서 캐리어의 재결합을 촉진시켜 minority carrier lifetime을 감소시키는 주요 요인이다. 또 다른 예상원인으로는 서로 다른 층 사이의 화학적 반응 혹은 원소의 확산이 촉진되어 계면에서 불순물 증가로 인해 전하 운반 특성에 부정적인 영향을 미치고, 결과적으로 implied V_{oc} 의 감소를 초래한다. 마지막으로 수소의 중요한 역할을 고려할 때, 고온 처리 과정에서의 수소 탈착 현상으로 고온에서 수소가 탈착하면 패시베이션 효과가 감소하고 결함 밀도가 증가하게 되며, 이는 재결합을 증가시켜 더욱더 carrier lifetime을 감소시킬 수 있다. 결론적으로 이러한 요인들은 태양전지 성능 저하로 이어질 수 있으므로, 최적의 후열처리 조건을 찾을 필요가 있을 것이다.

이중접합 실리콘 태양전지에 투명전극과 반사방지막으로 사용하는 ITO의 annealing에 대한 영향을 확인하기 위

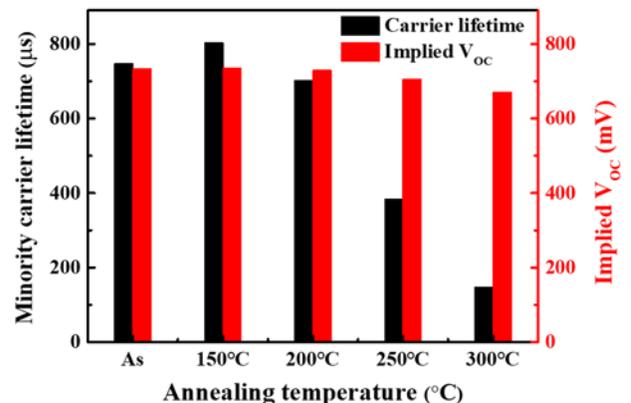


Fig. 3. Transmittance and haze ratio at different chemical etching solution (BHF, HF 1%, HF 5%, HF 10%) (the inset images in the graph have performed by FE-SEM for glass etching).

해 유리 기판에 100 nm를 증착하였는데 100~300°C의 온도 범위, 50°C 단위로 질소 분위기에서 1시간 동안 annealing 공정을 진행하였다. 그림 4(a)는 annealing 온도에 따른 ITO의 전기적 특성을 나타낸 것으로 annealing 온도에 따른 ITO의 캐리어 농도 변화는 $2.2\sim 3.33\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 로 큰 차이는 없었으나 이동도는 250°C에서 $23.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 급격히 감소하다가 300°C에서 이동도 $28.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로 약간 증가하는 경향을 보였다. 이동도의 급격한 감소는 annealing 온도 증가에 따른 ITO에 생성되는 결정립계에 의해서 scattering이 일어나 감소하며 300°C에서 캐리어 농도가 약간 증가한 현상에 의한 것이다. 그림 4(b)는 annealing 공정 온도에 따른 ITO의 투과도를 나타낸 것으로 300°C의 온도에서 as-dep 샘플과 비교했을 때 가시광 영역(600~1,100 nm)의 투과도가 3.4% 증가하는 것을 볼 수 있다. 가시광 영역 투과도의 증가는 결정립의 크기 증대에 따른 결정립계에서 광 흡수 감소 때문에 증가한 것으로 판단된다. 광학 밴드갭은 annealing 하기 전의 3.57 eV에서 250°C 조건에서 3.81 eV까지 증가하는데 이는 캐리어 농도의 증가와 관련이 있다.

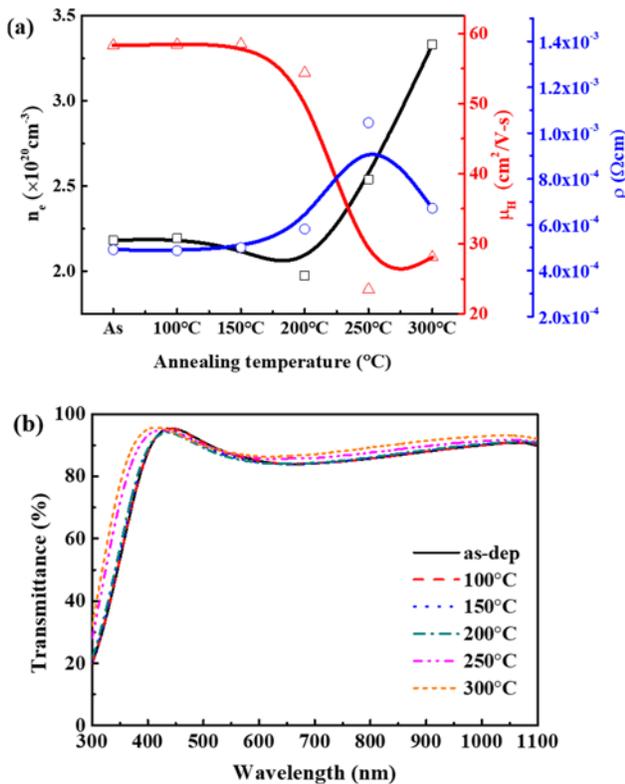


Fig. 4. (a) Electrical (hall-effect measurement) and (b) optical (transmittance) properties of ITO samples annealed at various temperatures.

그림 5는 이중접합 태양전지의 p-type $\mu\text{-SiO:H}$ 및 ITO의 annealing 공정 유무에 따라 비교한 전류 및 전압 특성 곡선을 나타낸 것으로 진행 전후를 비교했을 때 annealing을 진행하게 되면 충전율(fill factor, FF) 약 2% 및 전류밀도 $0.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 증가로 이어져 변환효율이 0.6%가 증가한 20.11%로 나타났다. 이는 p-type $\mu\text{-SiO:H}$ 의 결정성 향상과 ITO contact 향상에 따라 FF가 개선된 것으로 볼 수 있으며 전류밀도 향상 효과는 annealing 온도 증가에 따른 광학적 밴드갭 향상과 함께 가시광 영역에서의 개선에 의한 것으로 분석할 수 있다.

이번 실험을 통해 비록 온도에 의한 열처리를 p-type의 미세결정질 실리콘 산화막 및 ITO 박막에 대해 진행했다. P-type 미세결정질 실리콘 산화막은 150°C에서 803 μsec 의 minority carrier lifetime를 관찰했으나 250°C 이후에서 384 μsec 및 300°C에서 148 μsec 까지 급격하게 감소하는 것을 확인하였는데 이는 intrinsic 비정질 실리콘 층 증착 조건의 공정온도보다 높은 온도로 열처리됨에 따라 수소가 out-diffusion되어 carrier lifetime이 감소한 것으로 예상할 수 있다. 아울러 단일 ITO 박막으로 열처리를 하였을 때는 온도 증가에 따른 캐리어 농도 증가로 인해 광학적 밴드갭 증가로 이어진 것을 알 수 있었다. 전체적으로 p-type의 $\mu\text{-SiO:H}$ & ITO의 열처리 온도가 150°C에서 최적화되었음을 확인하였고 열처리 전후의 태양전지 전류-전압 특성을 확인한 결과 $0.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도 및 2%의 충전율 개선 효과는 변환효율 향상으로 이어졌다. 하지만 효율을 개선하기 위한 열처리 공정에 대해 기존 온도 조건 외에 가스 분위기 및 압력 등의 열처리 변수를 세밀하게 조절하여 최적화한다면 효율 개선의 여지는 있을 것으로 볼 수 있다.

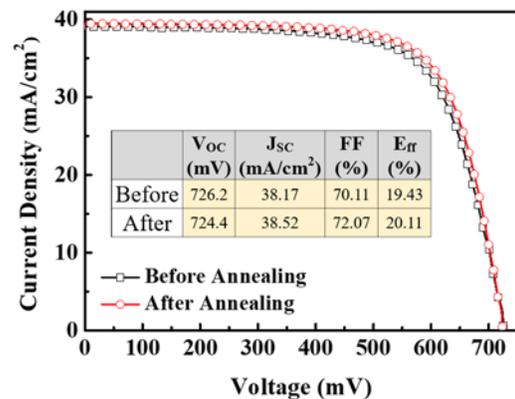


Fig. 5. Current-voltage curves with comparison of before and after annealing (p-type $\mu\text{-SiO:H}$ & ITO 150°C).

ORCID

Hyeong Gi Park
Junsin Yi

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

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] H. Lin, M. Yang, X. Ru, G. Wang, S. Yin, F. Peng, C. Hong, M. Qu, J. Lu, L. Fang, C. Han, P. Procel, O. Isabella, P. Gao, Z. Li, and X. Xu, *Nat. Energy*, **8**, 789 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01255-2>
- [2] W. Liu, J. Shi, L. Zhang, A. Han, S. Huang, X. Li, J. Peng, Y. Yang, Y. Gao, J. Yu, K. Jiang, X. Yang, Z. Li, W. Zhao, J. Du, X. Song, J. Yin, J. Wang, Y. Yu, Q. Shi, Z. Ma, H. Zhang, J. Ling, L. Xu, J. Kang, F. Xu, J. Liu, H. Liu, Y. Xie, F. Meng, S. De Wolf, F. Laquai, Z. Di, and Z. Liu, *Nat. Energy*, **7**, 427 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01018-5>
- [3] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, *IEEE J. Photovoltaics*, **4**, 1433 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2352151>
- [4] Z. Sun, X. Chen, Y. He, J. Li, J. Wang, H. Yan, and Y. Zhang, *Adv. Energy Mater.*, **12**, 2200015 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202200015>
- [5] S. Schäfer and R. Brendel, *IEEE J. Photovoltaics*, **8**, 1156 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2824024>
- [6] T. F. Schulze, L. Korte, E. Conrad, M. Schmidt, and B. Rech, *J. Appl. Phys.*, **107**, 023711 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.3267316>
- [7] C. Battaglia, A. Cuevas, and S. De Wolf, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 1552 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/C5EE03380B>
- [8] S. M. Iftiqar and J. Yi, *Curr. Appl. Phys.*, **50**, 107 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2023.04.002>
- [9] M. Morales-Masis, S. M. De Nicolas, J. Holovsky, S. De Wolf, and C. Ballif, *IEEE J. Photovoltaics*, **5**, 1340 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2450993>
- [10] M. Ju, Y. J. Lee, J. Lee, B. Kim, K. Ryu, K. Choi, K. Song, K. Lee, C. Han, Y. Jo, and J. Yi, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **100**, 204 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.01.018>
- [11] S. Li, M. Pomaska, A. Lambertz, W. Duan, K. Bittkau, D. Qiu, Z. Yao, M. Luysberg, P. Steuter, M. Köhler, K. Qiu, R. Hong, H. Shen, F. Finger, T. Kirchartz, U. Rau, and K. Ding, *Joule*, **5**, 1535 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.004>
- [12] K. Tao, D. Zhang, J. Zhao, L. Wang, H. Cai, and Y. Sun, *J. Non-Cryst. Solids*, **356**, 299 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2009.12.001>
- [13] X. J. Hao, E. C. Cho, Y. S. Shen, G. Conibeer, and M. A. Green, *Nanotechnology*, **19**, 424019 (2008).
doi: <https://stacks.iop.org/Nano/19/424019>
- [14] S. Bakhshi, N. Zin, H. Ali, M. Wilson, D. Chanda, K. O. Davis, and W. V. Schoenfeld, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **185**, 505 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.006>
- [15] D. C. Moritz, W. Calvet, M.A.Z. Pour, A. Paszuk, T. Mayer, T. Hannappel, J. P. Hofmann, and W. Jaegermann, *Sol. RRL*, **7**, 2201063 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/solr.202201063>