

# 수소 도핑된 인듐 산화막에 따른 실리콘 이종 접합 태양전지 성능에 미치는 영향

박형기<sup>1,2</sup>, 이재형<sup>3</sup>, 이준신<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 군산대학교 기초과학연구소

<sup>2</sup> 사마르칸트 국제기술대학 재생에너지학과

<sup>3</sup> 성균관대학교 전자전기공학부

## Impact of Hydrogen-Doped Indium Oxide Films on the Performance of Silicon Heterojunction Solar Cells

Hyeong Gi Park<sup>1,2</sup>, Jaehyeong Lee<sup>3</sup>, and Junsin Yi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> The Institute of Basic Science, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

<sup>2</sup> Department of Renewable Energy, Samarkand International University of Technology, Samarkand 140100, Uzbekistan

<sup>3</sup> School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received August 2, 2024; Revised September 5, 2024; Accepted September 9, 2024)

**Abstract :** We investigated the potential of IO:H thin films and hydrogen doping to improve current density and fill factor for enhancing the performance of silicon heterojunction solar cells. We revealed that a transmittance of 86.7% and work function of 5.4 eV could be achieved by injecting 3 sccm of hydrogen gas. The lattice constant of 1.037 nm at the AB site indicates an anion antibonding tendency, and the work function increases as the Fermi level shifts to the valence band. Based on these findings, we fabricated a silicon heterojunction solar cell and achieved an efficiency of 18.53%, while computer simulation confirmed a conversion efficiency of 24.65%, an open-circuit voltage of 724 mV, and a fill factor of 82.72% at a current density of 41.15 mA/cm<sup>2</sup>.

**Keywords:** Silicon heterojunction, Sputtering, Hydrogen doping, Indium oxide, Current density, Fill factor

### 1. 서론

기존 화석연료 기반의 에너지 발전을 대체하는 신재생 에너지로 태양전지는 태양광을 전기로 변환하는 소자이다. 태양전지 기술은 꾸준한 발전을 거듭해 왔으며, 효율과 안정성의 향상을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 다

양한 태양전지 구조 중, 특히나 실리콘 이종접합 태양전지는 높은 효율, 낮은 제작 비용으로 인해 주목받고 있으나 여전히 transparent conducting oxide (TCO)의 특성을 최적화하는 것이 중요한 과제로 남아 있다 [1]. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ITO, AZO 및 IZO, IZRO 등과 같은 TCO는 두께 80 nm에서 면저항 40 ohm/sq, 가시광선 영역(400~800 nm)에서 투과도 80% 이상, 높은 이동도, 일함수 등의 요구 조건을 만족해야 한다 [2]. 80 nm의 두께는 광학적 특성을 만족하지만 전기적 특성을 만족하기 위해서 TCO 두께를 증가하거나 도핑 농도를 높여야 한다. 하지만 도핑이 증가할수록 자유

✉ Hyeong Gi Park; [hspark007@gmail.com](mailto:hspark007@gmail.com)

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.

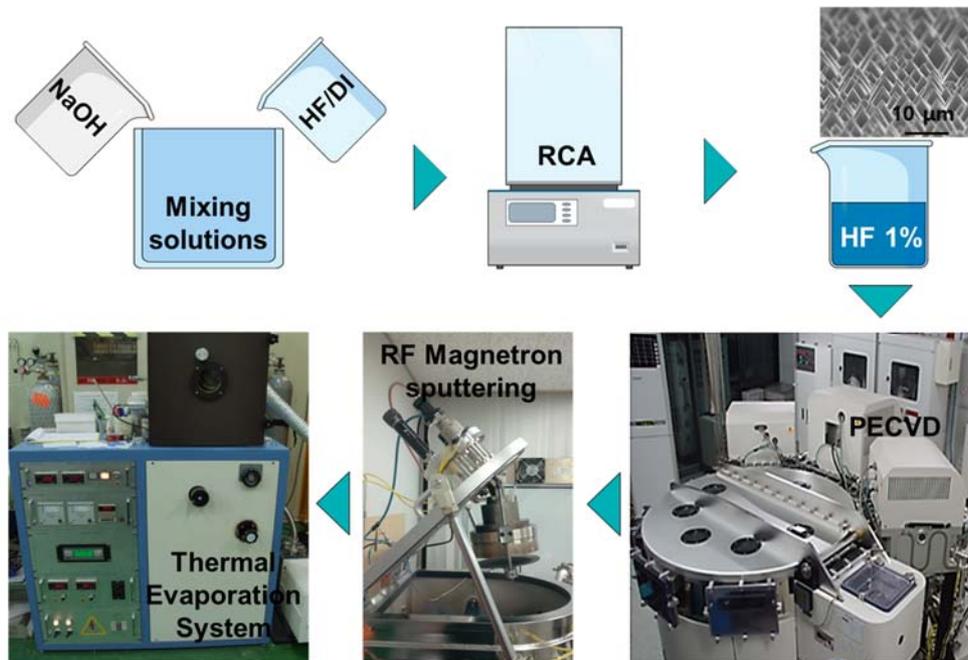
캐리어 흡수(free carrier absorption, FCA)로 인해 투과도가 80% 이하로 낮아지며 낮은 전류밀도(low current density)를 초래한다 [3-5]. TCO/a-Si:H (p)가 접촉하면 계면층에서 Schottky barrier가 형성되는데 p형 반도체와 접촉하는 TCO의 일함수(work function) 역시 증가해야 한다 [6-10]. 일반적으로 AZO 및 ITO의 일함수는 각각 4.3 eV와 4.5 eV로, 이는 캐리어 수집 효율(carrier collection efficiency)을 저하시켜 낮은 전류밀도와 낮은 fill factor (FF)로 태양전지의 효율 증가가 어려워 개선해야 한다 [8,11].

위의 제시된 문제를 해결하기 위해서 도핑 소스가 없는 투명전극 소재를 제작해야 하는데  $In_2O_3$ 의 수소 도핑은 전도 전자의 농도를 조절하고 fermi level을 변화시켜 전기적 특성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 지닌다. 수소는 금속 산화물에서 얇은 공여 상태(shallow donor state)를 형성하며, 높은 이동성(high mobility)은 필름 내에서 결정립계 결함(grain boundary defects)과 중성 불순물(neutral impurities)의 억제에 기인하며 낮은 형성 에너지와 큰 결합 에너지를 가진다 [12-17]. 이러한 특성은 TCO/a-Si:H (p) 계면에서의 반사 손실(reflection loss)과 TCO층 내의 흡수 손실(absorption loss)을 줄이며  $H_2$  플라즈마를 통한 변형 없이도 열처리 과정에서 전기 저항

률(electrical resistivity)이 감소하는 효과를 보이는데 이는 산소 공공(oxygen vacancies)에 해당하는 것으로 이처럼 수소는 TCO의 전도도(conductivity)에 유익한 효과를 가진다 [12,14,18,19]. 이번 연구에서 수소 도핑에 따른 IO:H 박막의 전기적, 광학적, 구조적 특성들이 미치는 영향을 분석하고 최적의 IO:H 박막을 도출하여 실리콘 이종 접합 태양전지 제작 및 성능 평가를 진행했으며 automat for simulation of hetero structures (AFORS-HET) 시뮬레이션으로 실리콘 이종접합 태양전지의 수치 계산을 통해 효율 한계치에 대해 평가하여 수소 도핑된 IO:H 박막의 실용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

실리콘 이종 접합 태양전지 제작에 따른 고려사항은 공정 온도로 thermal budget에서 자유롭지 못하다.  $350^{\circ}C$  이상의 고온에서 amorphous silicon (a-Si) 박막을 증착 시, 결정계 실리콘(c-Si) 표면 결함을 줄여준 수소가 확산되어 활성화 에너지를 증가하므로 오히려 태양전지의 특성 저하를 초래할 수 있어 전체 공정 온도는  $200^{\circ}C$  이하로 진행하였으며 IO:H 박막 증착 조건은 표 1과 같이 나타내었다.



**Fig. 1.** Schematic of silicon heterojunction solar cells (NaOH/HF/DI for texturing solution, RCA solution for removal of organic or metal byproduct, HF 1% solution for removal of native oxide on the c-Si), PECVD and RF magnetron sputtering were used to deposit the layer by layer.

**Table 1.** Deposition conditions of IO:H thin films by RF magnetron sputtering.

Parameter	Value
Ar gas flow	30 sccm
H <sub>2</sub> gas flow	0, 1, 2, 3, 5, 10 sccm
Substrate-target distance	10.5 cm
RF power	100 W
Substrate temperature	27°C
Base pressure	5×10 <sup>-7</sup> Torr
Working pressure	2 mTorr

박막 증착에 앞서 우리가 이번에 사용한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 타겟은 4인치 크기의 디스크 형태로 두께는 1/8인치이며 초기 진공도 10<sup>-7</sup> Torr를 유지하였으며 공정 압력 2 mTorr, 가동 전력 100 W, Ar 30 sccm 고정, H<sub>2</sub> 가스를 주입하며 진행하였다. UV-VIS spectrophotometer를 이용하여 400~2,500 nm의 파장 길이에 대해 투과도, 반사도를 측정하였으며 X-ray diffraction (XRD) 장비를 활용하여 Ar/H<sub>2</sub> 가스 주입량에 따른 단일 박막의 구조에 대해 분석하였다. XRD 결과를 바탕으로 박막에 대한 격자 상수 계산 및 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)로 일함수를 측정했으며 526~536 eV의 결합 에너지 구간에서 O<sub>1s</sub> peak

에 대해 분석하였다. FE-SEM 분석을 통해 박막의 표면 특성에 대해 조사하였다.

n-type 180 μm 두께의 c-Si wafer를 준비해 NaOH 또는 HNO<sub>3</sub>/HF/DI water를 이용하여 texturing 공정을 진행한다. NaOH 2%, IPA 8.75%, 온도 84~86°C, 5분간 texturing을 진행하여 표면 조직의 크기를 5 μm 이하로 제작하였다. Texturing 후, RCA1 세정을 통해 wafer 표면의 particle과 유기물, RCA2 세정은 금속 불순물을 제거하였고 PECVD chamber에서 공정을 들어가기 전, HF 49%를 DIW로 희석한 1% 용액을 만들어 30초간 wafer를 침전하여 자연산화막을 제거한다. PECVD chamber를 이용해 비정질 실리콘 박막을 적층하는데 양면에 진성층, 전면부 p형 도핑층, 후면부 n형 도핑층을 각각 증착한다 [20]. 이후 IO:H 박막을 RF magnetron sputtering을 통해 진행했으며 두께는 전면과 후면에 따라 각각 110 nm, 130 nm를 적층했는데 조직화 구조는 경사진 형태를 고려한 것이다. Thermal evaporation system을 이용하여 전면은 Ag (30 nm)/Al (1 μm) bilayer 및 후면은 Al (1.2 μm) 두께의 single layer로 진행했으며 전극 형성을 위해 shadow mask를 사용하였다. 제작 완료된 실리콘 이종접합 태양전지는 AM1.5 조건하의 전류-전압 특성을 얻고자 연구실에서 직접 제작한 태양광 시뮬레이터를 이용했으며 photodiode를 통해 1-sun을 확인하고서 측정을 진행하였다. 측정을 통해 얻은 결과를 바탕으로 이론적 계산에 의

**Table 2.** Input parameter values of silicon heterojunction solar cells in AFORS-HET simulation (the details of numerical values are given below).

Parameter	c-Si (n)	a-Si:H (n)	a-Si:H (i)	a-Si:H (p)
Layer thickness (nm)	180,000	5	3	5
Dielectric constant	11.9	11.9	11.9	11.9
Electron affinity (eV)	4.05	3.9	3.9	3.9
Band gap (eV)	1.124	1.72	1.72	1.72
Optical band gap (eV)	1.124	1.72	1.72	1.72
Effective conduction band density (cm <sup>-3</sup> )	2.843×10 <sup>19</sup>	1×10 <sup>20</sup>	1×10 <sup>20</sup>	1×10 <sup>20</sup>
Effective valence band density (cm <sup>-3</sup> )	2.682×10 <sup>19</sup>	1×10 <sup>20</sup>	1×10 <sup>20</sup>	1×10 <sup>20</sup>
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1,111	5	5	5
Hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	421.6	1	1	1
Doping concentration of acceptors (cm <sup>-3</sup> )	0	0	0	1.2×10 <sup>19</sup>
Doping concentration of donators (cm <sup>-3</sup> )	5×10 <sup>15</sup>	3.78×10 <sup>18</sup>	0	0
Thermal velocity of electrons (cm/s)	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>
Thermal velocity of holes (cm/s)	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>7</sup>
Layer density (g/cm)	2.328	2.328	2.328	2.328

한 효율 개선 정도를 확인하고자 컴퓨터 모의 시뮬레이션 AFORS-HET을 사용하는데 주로 이종접합 태양전지의 설계와 분석에 사용되며 톨을 통해 다양한 반도체층과 인터페이스를 모델링할 수 있으며 전류-전압 되에도 양자효율 (QE), 광 및 전기 발광, 표면 광전압(SPV) 등의 측정법 또한 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램으로 wafer 두께, doping concentration, 비정질 실리콘층의 두께 등의 다양한 변수를 이용해 진행하였고 좀 더 자세한 고정변수는 아래 표 2와 같이 나타내었다 [21-24].

### 3. 결과 및 고찰

그림 2(a)는 수소 가스 유량에 따른 IO:H 박막의 투과도를 나타낸 것이다. 순수 Ar 가스 공정을 진행하여 400~2,500 nm의 파장 영역에서의 평균 투과도가 83.43%이며 수소 가스 1 sccm에서 700 nm 이상의 장파장 영역에서 투과도가 상승했으며 평균 투과도 88.93%를 나타내었는데 수소가 박막의 광학적 특성에 영향을 미친 것을 알 수 있다. 3 sccm에서는 평균 투과도 86.74%로 수소가 박막의 결정구조에 크게 영향을 주지 않았음을 알 수 있다. 5 sccm부터 1,500 nm 이상의 장파장 영역에서 투과도가 급격히 감소하여 10 sccm에서 71.11%의 평균 투과도를 나타내었는데 과도한 수소가 오히려 박막의 결함을 증가했거나 구조적인 손상으로 추측된다 [25]. 그림 2(b)는 수소 가스 유량에 따른 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 반사도를 나타낸다. 1 sccm 조건에서 400~2,500 nm 파장 길이 범위의 평균 반사도가 19.17%로 측정되었으며 반면에 3 sccm 조건에서는 평균 반사도가 가장 높은 26.06%를 나타냈으며, 800 nm 이상에서 반사도가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 5

sccm과 10 sccm 조건에서는 반사도가 이전의 결과와는 반대로 낮아진 결과를 보였는데 이번 결과를 통해 수소 가스가 IO:H 박막의 광학 특성에 미치는 영향을 명확하게 보여주었으며 박막 제작에서 수소 가스를 신중하게 조절하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 이번 실험에서 3 sccm 조건까지 1,500 nm의 장파장 영역 이상에서 80% 이상의 투과도가 유지하며 반사도는 점차 장파장 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다.

그림 3(a)는 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 XRD 결과를 나타내며, 주요 피크는 (211), (222), (400), (440) 그리고 (622)이 관찰되었는데 다른 그룹들과 유사한 결과를 보였다 [26,27]. (211) peak은 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정 구조의 지표로 모든 샘플에서 관찰되었으며 (222) peak은 결정의 대칭성을 반영하는데 수소 도핑이 결정 구조에 미치는 영향을 보여주는 것으로 2 sccm까지 peak 강도가 증가하나 3 sccm 수소의 경우 peak 강도가 오히려 감소하고 폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 10 sccm에서 폭이 넓어진 상태를 유지하나 peak 강도가 증가한 것을 알 수 있다. 5 sccm 이상일 경우 (211), (400), (622) peaks은 거의 사라지고 (222) peak에서 다소 넓어지는 결과를 나타내고 있는데 이는 수소 도핑에 의한 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 결정 구조에 결함이 증가하거나 결정 격자 내에서 수소가 삽입됨에 따라 국부적인 구조적 비대칭성이 유발된 결과로 추측된다 [28].

그림 3(b)는 수소 가스 변화에 따른 IO:H 박막의 일함수 및 격자 상수를 나타낸 것이다. 수소를 2~3 sccm가량 주입하였을 때 lattice constant가 1.037~1.036 nm로 가장 확장되었는데 수소 원자가 자리하여 결정립의 억제를 가져왔다는 것을 의미한다. 수소 가스 3 sccm의 유량에서 일함수가 5.4 eV이며 5 sccm 이상을 주입하면 오히려 일함수는 4.3 eV로 급격히 감소하는데 수소가 interstitial로

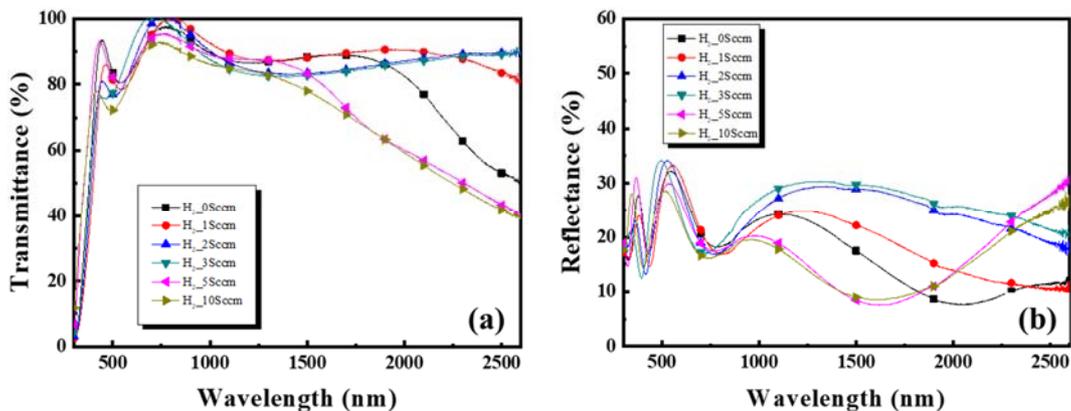


Fig. 2. Optical properties of IO:H thin films as a function of hydrogen gas flow (0~10 sccm): (a) transmittance and (b) reflection.

BC site 위치에 자리하기 때문이다 [29]. 높았는데 반면에 일함수가 증가하는 경우, 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 AB site 위치에 자리하는데 격자 상수가 커지면서 anion anti-bonding 경향을 보여 fermi level이 valence band 쪽으로 소폭 이동하여 일함수 증가로 이어졌다 [29]. 이처럼 수소 주입량에 따라 크게 AB site와 BC site로 나뉘게 되는데 이는 doping site 위치에 따라 일함수에 미치는 영향이 크게 변하기 때문이며 앞서 설명한 바와 같이 lattice constant와 밀접한 관계를 갖게 된다. 일함수의 영향을 좀 더 자세히 확인하고자 XPS를 통해 분석하였다. 위의 결과를 통해 3 sccm에서 일함수가 가장 높다는 것을 알 수 있는데 이는 실리콘 이종접합 태양전지에서 p층과 접촉할 때 높은 일함수를 가진 TCO와 접촉하게 되면 valence band

의 hole barrier height를 낮추는 역할을 하기 때문에 태양전지 적용에 부합할 것으로 예상된다.

그림 4(a)는 수소를 주입하지 않은 경우와 수소 1, 2 sccm을 주입했을 때 IO:H 박막의 O<sub>1s</sub>를 나타낸 것으로 수소 주입에 따른 결합 에너지 스펙트럼의 이동에 따른 영향을 보여주고 있다. 먼저, 529.87 eV에서의 피크는 비정질 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상의 산소 격자에 해당하며 수소가 없는 경우, 피크 폭이 약간 좁은 상태로 비정질 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 내의 산소 격자가 많다는 의미이며 수소가 존재할 때 피크의 폭이 넓어지며 비정질 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 산소 격자의 양이 감소함을 보여준다. 수소 도핑은 결정화의 역할을 가져오며 수소 원자가 격자 내 더 많은 불게 되며 grain boundary 형성 중에 많은 defect들을 수반하기 때문에 전기적 특성에 악영향이 된다.

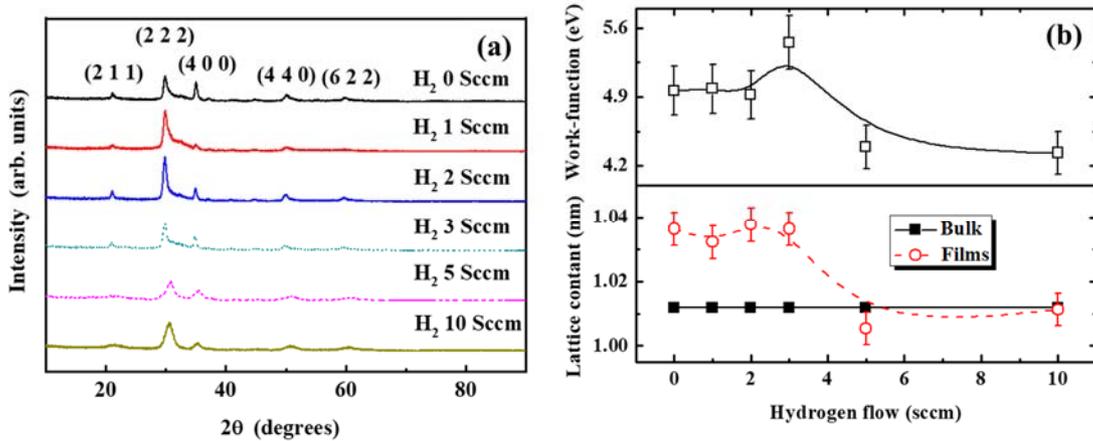


Fig. 3. (a) X-ray diffraction pattern and (b) work function and lattice constant of hydrogen gas flow (0~10 sccm).

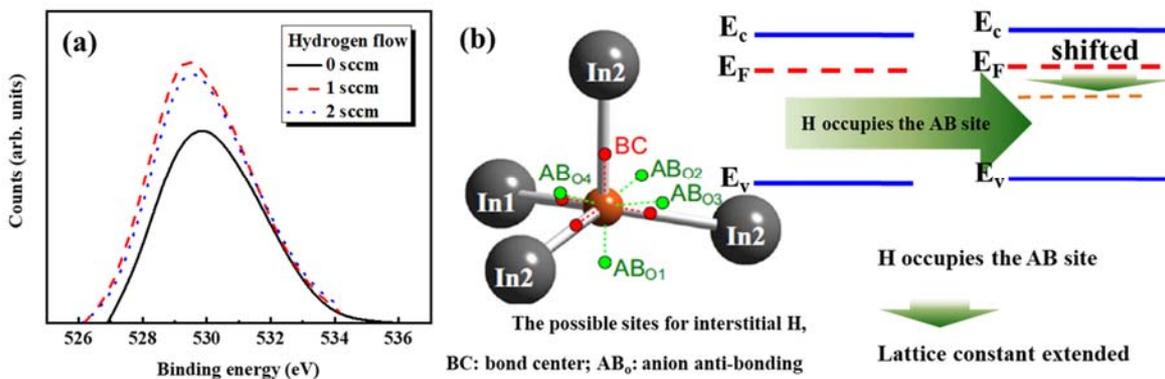


Fig. 4. (a) O<sub>1s</sub> X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) spectra of different hydrogen flow (0, 1, 2 sccm), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (b) bixbyte bonding structure, and interstitial doping site of hydrogen bonding.

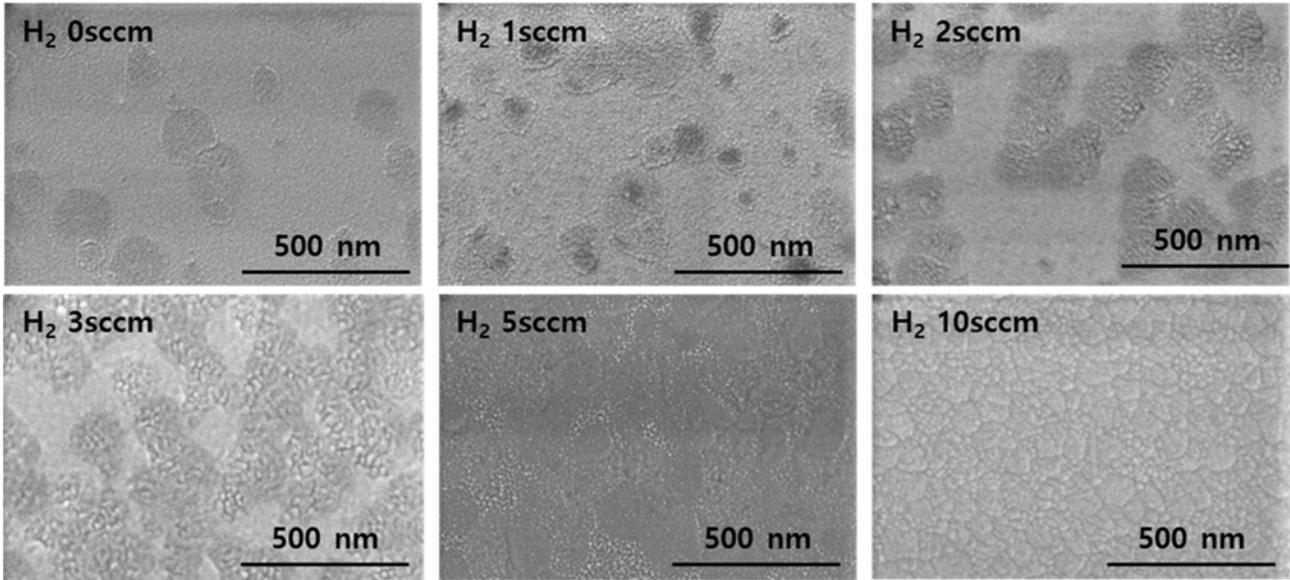


Fig. 5. FE-SEM images of hydrogenated  $\text{In}_2\text{O}_3$  (IO:H) thin film as a function of hydrogen gas flow.

수소 가스 주입에 따라 IO:H 박막의 표면 미세구조의 변화를 비교하고자 FE-SEM을 통해 관찰하여 그림 5와 같이 나타내었다. 1~2 sccm에서 표면에 미세한 변화를 보이는데 수소에 의해 결정립이 재배열되기 시작했으며 3 sccm에서 10 nm 이하의 작은 결정립이 복잡하게 표면구조가 형성되는 것을 알 수 있으며 10 sccm에서 20~30 nm 및 50~60 nm 크기의 결정립 구조가 형성된 것을 관찰하였다. 그림 6은 IO:H 박막을 이용해 제작한 실리콘 이종접합 태양전지 결과를 나타내었다. 수소 가스 3 sccm 주입 시, IO:H 박막의 일함수가 5.4 eV로 제작한 태양전지 효율은 18.53%로 개방전압 703 mV, 전류밀도  $37.04 \text{ mA/cm}^2$ , fill factor (FF) 71.17%를 나타내었다. 실제로 제작한 태양전지를 가지고 AFORS-HET simulation을 활용하여 fitting을 진행하였는데 개방전압 702.2 mV, FF 70.74%, 전류밀도  $37.47 \text{ mA/cm}^2$ 을 얻어 변환효율 18.61%를 확인하였다. 웨이퍼 두께부터 도핑층의 두께와 도핑 농도, TCO 일함수 등의 다양한 변수를 가변하여 24.65%의 변환효율을 얻었다. (개방전압 724 mV, 전류밀도  $41.15 \text{ mA/cm}^2$ , FF 82.72%) 기존 4.3~4.6 eV의 일함수를 가진 TCO 박막을 사용한 경우보다 hole carrier의 주입을 용이하게 한 것으로 TCO/p 사이에 barrier height를 거의 없애기에 기존 holes의 trapping 및 accumulation을 통한 재결합의 문제를 해소했기 때문이며 시뮬레이션을 통해 전류밀도가 크게 개선된 것은 visible 영역에서 투과도 개선과 광학적 bandgap 향상의 영향으로 분석되었다 [30].

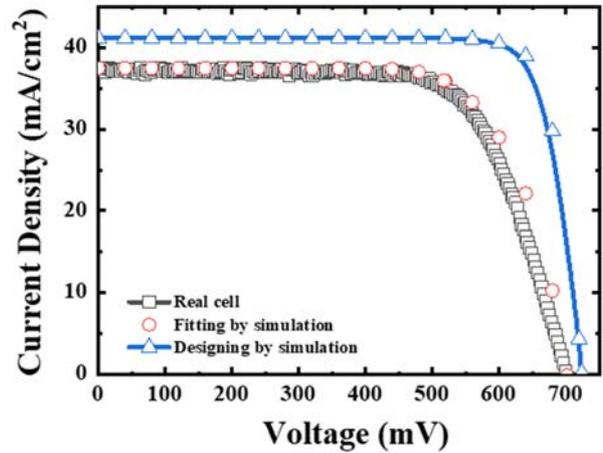


Fig. 6. Current-voltage curves for silicon heterojunction solar cells (real cell, fitting and designing by simulation of AFORS-HET).

#### 4. 결론

실리콘 이종접합 태양전지의 TCO 박막 적용을 위한 수소 가스 주입량에 따른 IO:H 박막의 미세구조, 광학적 특성 및 전기적 특성에 중요한 영향을 확인하였다. UV-VIS 측정을 통해 3 sccm 범위까지의 수소 가스를 주입하면 평균 투과도 80% 이상을 유지하는 결과로 수소 가스를 소량 주입함에 따라 표면에 미세한 입자들이 나타나기 시작해 결정립 성장과 재배열을 유도하여 투과도 특성이 개선될

수 있음을 확인하였다. 반면에 10 sccm의 수소 가스를 과도하게 주입함에 따라 IO:H 박막에 손상을 일으켜 오히려 투과율이 71%로 크게 감소한 것을 관찰하였다. 결정학적 특성을 확인하기 위해 XRD를 통해 진행하여 3 sccm 범위에서 가장 높은 1.037 nm의 lattice constant를 얻었으며 일함수가 5.4 eV로 증가하였다. 이러한 결과를 바탕으로 제작한 실리콘 이종접합 태양전지의 변환효율은 18.53%로 전류-전압 분석법으로 확인하였으며 AFORS-HET 시뮬레이션을 통해 다양한 변수를 가변하여 개방전압 724 mV, 전류밀도 41.15 mA/cm<sup>2</sup>, FF 82.72%로 변환효율 24.65%의 결과를 얻었다.

## ORCID

Hyeong Gi Park

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

## 감사의 글

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

## REFERENCES

- [1] S. Park, S. Jeong, J. Choi, Y. Kim, and J. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 49 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.1.8>
- [2] H. Park, Y. J. Lee, J. Park, Y. Kim, J. Yi, Y. Lee, S. Kim, C. K. Park, and K. J. Lim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **19**, 165 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0026-8>
- [3] C. Han, R. Santbergen, M. van Duffelen, P. Procel, Y. Zhao, G. Yang, X. Zhang, M. Zeman, L. Mazzarella, and O. Isabella, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, **30**, 750 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/pip.3550>
- [4] Y. Jiang, T. Feurer, R. Carron, G. T. Sevilla, T. Moser, S. Pisoni, R. Erni, M. D. Rossell, M. Ochoa, R. Hertwig, A. N. Tiwari, and F. Fu, *ACS Nano*, **14**, 7502 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03265>
- [5] L. Antognini, C. Sthioul, J. Dréon, V. Paratte, D. Türkay, L. L. Senaud, C. Ballif, and M. Boccard, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **248**, 111975 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111975>
- [6] 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>
- [7] P. Muralidharan, M. A. Leilaoui, W. Weigand, Z. C. Holman, S. M. Goodnick, and D. Vasilevska, *IEEE J. Photovoltaics*, **10**, 363 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2957655>
- [8] K. U. Ritzau, M. Bivour, S. Schröer, H. Steinkemper, P. Reinecke, F. Wagner, and M. Hermle, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **131**, 9 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.026>
- [9] D. Rached and R. Mostefaoui, *Thin Solid Films*, **516**, 5087 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.02.031>
- [10] C. Messmer, M. Bivour, C. Luderer, L. Tutsch, J. Schön, and M. Hermle, *IEEE J. Photovoltaics*, **10**, 343 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2957672>
- [11] N. Ahmad, H. Zhou, P. Fan, and G. Liang, *EcoMat*, **4**, e12156 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12156>
- [12] T. Koida, H. Fujiwara, and M. Kondo, *J. Non-Cryst. Solids*, **354**, 2805 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrystol.2007.09.076>
- [13] P.D.C. King, R. L. Lichti, Y. G. Celebi, J. M. Gil, R. C. Vilão, H. V. Alberto, J. Piroto Duarte, D. J. Payne, R. G. Egdell, I. McKenzie, C. F. McConville, S.F.J. Cox, and T. D. Veal, *Phys. Rev. B*, **80**, 081201(R) (2009).  
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.081201>
- [14] T. Koida, H. Sai, and M. Kondo, *Thin Solid Films*, **518**, 2930 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.060>
- [15] J. Weber, E. V. Lavrov, and F. Herklotz, *Phys. B*, **407**, 1456 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.09.061>
- [16] D. Erfurt, M. D. Heinemann, S. S. Schmidt, S. Körner, B. Szyszka, R. Klenk, and R. Schlattmann, *ACS Appl. Energy Mater.*, **1**, 5490 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01039>
- [17] C. G. Van de Walle and A. Janotti, *Proc. 11th Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials (EURODIM 2010)* (University of Pécs, Hungary, 2010) p. 012001.  
doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/15/1/012001>
- [18] K. Okada, S. Kohiki, S. Luo, D. Sekiba, S. Ishii, M. Mitome, A. Kohno, T. Tajiri, and F. Shoji, *Thin Solid Films*, **519**, 3557 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.249>
- [19] M. Ando, M. Takabatake, E. Nishimura, F. Leblanc, K. I. Onisawa, and T. Minemura, *J. Non-Cryst. Solids*, **198**, 28 (1996).  
doi: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00648-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00648-6)
- [20] S. Kim, J. Jung, Y. J. Lee, S. Ahn, S. Q. Hussain, J. Park, B. S. Song, S. Han, V. A. Dao, J. Lee, and J. Yi, *Mater. Res. Bull.*, **58**, 83 (2014).

- doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.05.003>
- [21] L. Zhao, C. L. Zhou, H. L. Li, H. W. Diao, and W. J. Wang, *Phys. Status Solidi A*, **205**, 1215 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1002/pssa.200723276>
- [22] EL-CAT Inc., *Properties of Silicon and Silicon Wafers*, <https://www.el-cat.com/silicon-properties.htm>
- [23] Si - Silicon Electrical Properties, <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/electric.html>
- [24] A.H.T. Le, V. A. Dao, D. P. Pham, S. Kim, S. Dutta, C.P.T. Nguyen, Y. Lee, Y. Kim, and J. Yi, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **192**, 36 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.001>
- [25] C. Han, L. Mazzarella, Y. Zhao, G. Yang, P. Procel, M. Tijssen, A. Montes, L. Spitaleri, A. Gulino, X. Zhang, O. Isabella, and M. Zeman, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 45586 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b14709>
- [26] Y. Magari, T. Kataoka, W. Yeh, and M. Furuta, *Nat. Commun.*, **13**, 1078 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28480-9>
- [27] T. Koida, H. Fujiwara, and M. Kondo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, L685 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.L685>
- [28] H. G. Park, S. Q. Hussain, J. Park, and J. Yi, *J. Mater. Sci.*, **59**, 13873 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09506-7>
- [29] S. Limpijumnong, P. Reunchan, A. Janotti, and C. G. Van de Walle, *Phys. Rev. B*, **80**, 193202 (2009).  
doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.193202>
- [30] H. G. Park and J. Yi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 439 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.4.12>