

유무기 하이브리드 태양전지 적용을 위한 탠덤형 비정질 실리콘 태양전지 최적화 기술

박진주* · 유상민

에너지융합공학과, 청주대학교, 음성, 28503

Optimization Amorphous Silicon Tandem Cell for an applying Inorganic-organic Hybrid Cell

Jinjo Park* · Sangmin Yoo

Department of Energy Convergence engineering, Cheong-ju University, Eumseong, 28503, Korea

Received September 12, 2024; Revised September 23, 2024; Accepted September 23, 2024

ABSTRACT: Purpose of higher conversion efficiencies, thin-film silicon solar cells based on amorphous silicon have been developed with a multiple-stack structure to fully utilize the absorption spectrum. Microcrystalline silicon ($\mu\text{-Si}$) is commonly used in the bottom cell of such tandem junction solar cells, offering improved conversion efficiencies. However, the requirement for a thicker absorption layer to generate sufficient photocurrent presents challenges, primarily due to the lower absorption coefficient of $\mu\text{-Si}$, resulting in longer deposition times and greater material thickness. To address these limitations, we propose the development of inorganic-organic hybrid solar cells by integrating a-Si tandem with solution-processed organic photovoltaic cells (OPVs), using low-bandgap semiconducting polymers. The OPVs have garnered significant attention as promising candidates for next-generation photovoltaic technology. As part of this effort, we have optimized the a-Si tandem cell by exploring different materials for a tunnel recombination layer and high quality intrinsic layers. The hybrid approach combines the advantages of both inorganic and organic materials, potentially offering a pathway towards more efficient and cost-effective solar cell solutions.

Key words: Amorphous silicon, Tandem junction, Solar cell, Inorganic-organic hybrid solar cells, Tunnel recombination layer, Intrinsic layer

1. 서론

태양전지 기술은 지속 가능한 에너지 공급을 위한 중요한 해결책 중 하나로, 높은 효율성과 낮은 제조 비용을 달성하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 박막 태양전지는 적은 재료 사용과 낮은 제조 비용으로 인해 차세대 태양전지 기술로 많은 주목을 받고 있으며, 특히 비정질 실리콘(a-Si)을 기반으로 한 박막 태양전지는 박막 증착 시 가스 조성, 온도 조절을 통해서 흡수 스펙트럼 가변이 용이한 소자이다. 이러한 특성을 이용하여 더 높은 광전 변환 효율을 실현할 수 있는 가능성을 지니고 있다.

유기 태양전지(organic photovoltaic cells, OPVs)는 가공이 쉬운 고분자를 기반으로 하여 제작 비용이 낮으면서도 저밴드

갭 특성을 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 비정질 실리콘과 같은 무기 재료와 함께 적층함으로써, 유기 태양전지의 광흡수 성능을 보완하고 전반적인 태양전지 효율을 향상시킬 수 있는 가능성이 크다.

a-Si 탠덤 구조는 직렬연결 시 개방전압(open circuit voltage, V_{oc})의 합산, 즉 'Voc 이득' 및 넓은 스펙트럼 이용이라는 장점을 이용할 수 있다. 또한 무기 a-Si 탠덤 셀의 흡수층 두께를 낮춰 광열화 현상을 줄일 수 있다는 장점을 갖고 있다.

본 연구는 유무기 하이브리드 태양전지의 효율을 높이기 위하여 비정질 실리콘을 기반으로 한 탠덤형 태양전지에서 고농도의 보론 도핑된 비정질 실리콘 박막의 재결합 층 적용과 고품위의 비정질 실리콘 박막을 적용하고자 한다.

2. 실험

유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지는 무기 박막 실리콘

*Corresponding author: jwjh3516@cju.ac.kr

Table 1. Deposition conditions of inorganic tandem cell

Layer		Gas flow (sccm)					Power density (mW/cm ²)	Pressure (Torr)	Temp. (°C)	Electrode Distance (mm)
		SiH ₄	H ₂	N ₂ O (+He 90%)	B ₂ H ₆ (+H ₂ 99%)	PH ₃ (+H ₂ 99%)				
Buffer	p-a-Si:H	30	149	-	1.5	-	71	0.2	180	40
	p-a-SiOx:H	10	95	50	15	-	57	0.4	110	30
p		10	100	50	10	-	57	0.4	110	30
i		10	70	-	-	-	28	0.4	180	40
			80							
			100							
n+		10	40	-	-	30	71	0.2	200	40
p+		3	21	-	9	-	14	0.1	200	60
i		10	10	-	-	-	21	0.2	200	20
n		30	120	-	-	30	71	0.2	200	40

Table 2. Optical bandgap (E_g) and activation energy (E_a) properties of composed layers for inorganic-organic hybrid triple cell

Parameters	ITO	Buffer	p	i	n	p	i	n	ITO	PEDOT :PSS	PTB7 :PCBM	TiO ₂	Al
Thickness (nm)	250	3	5	70	10	7	350	25	20	30	110	20	300
E _g (eV)	4.0	2.05	2.15	1.83	1.79	1.79	1.80	1.81	4.0	2.0	1.55	3.2	-
E _a (eV)	-	0.48	0.59	-	0.16	0.4	-	0.20	-	-	-	-	-

탠덤 태양전지와 유기 태양전지를 결합하여 제작되었다. 무기 실리콘 탠덤 전지 구조(buffer/p/i/n+/p+/i/n)는 ITO (Indium Tin Oxide) 코팅 유리, FTO 또는 FTO/AZO 코팅 유리 위에 형성되었으며, 클러스터형 PECVD 장비를 사용하여 13.56 MHz의 라디오 주파수의 플라즈마 소스를 이용하여 (비정질 실리콘(a-Si) p-층, 비정질 실리콘 산화물(a-SiOx) p-층, 60 MHz의 초고주파 플라즈마 전원을 사용하여 a-Si 또는 프로토실리콘(pc-Si) i-층 증착하였다. 무기 실리콘 탠덤 태양 전지 증착 전에 ITO 코팅 유리, FTO 또는 FTO/AZO 코팅 유리 기판은 아세톤, 아이소프로필 알코올, 탈이온수(DI)로 각각 5분씩 세척하였다. 무기 실리콘 탠덤 태양 전지의 증착 조건은 Table 1과 Table 2에서 자세히 설명하였다. 증착 후 무기 실리콘 탠덤 태양 전지를 진공 챔버에서 꺼낸 뒤, 무기 실리콘 탠덤 태양 전지 후면에 유기 전지가 연결될 부분에 얇은 ITO 층을 추가로 증착하였다. 20 nm 두께의 ITO 연결 층은 DC 마그네트론 스퍼터링을 통해 n형 a-Si 층 위에 증착되었으며, 필름 성장 속도는 0.1 nm/s였다. 전도성 ITO 연결 층은 단락을 방지하기 위해 새도 마스크를 사용해 활성 영역에만 제한적으로 증착하였다. Fig. 1(a) 무기 실리콘 탠덤 전지와 (b) 유·무기 하이브리드 3중 접합 태양 전지의 구조를 나타낸 것이다.

유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지는 위에서 언급한 대로 전공수송층으로 poly (3,4-ethylenedioxythiophene):poly (styrene sulfonate) PEDOT (Clevios P, VP AI 4083):PSS, 광활

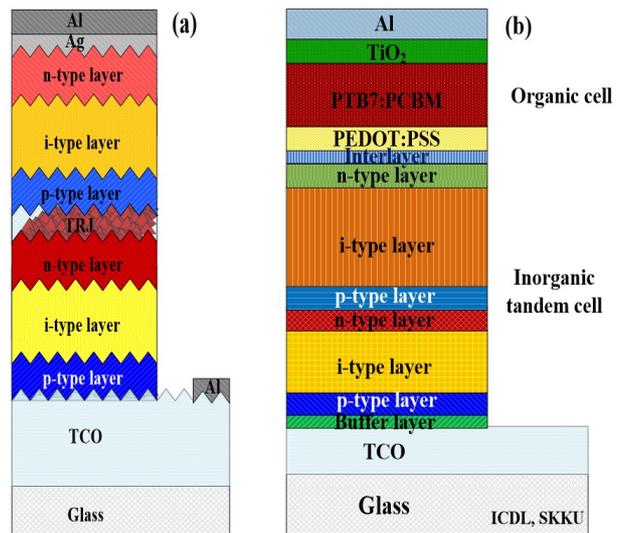


Fig. 1. (a) Device configuration of the inorganic silicon tandem solar cell on texture FTO glass (b) Schematic diagram of triple junction Inorganic organic hybrid multi-junction solar cell

성층으로 PTB7:PCBM, 전자수송을 위한 TiO₂ 층 및 Al 전극을 순차적으로 증착하여 제작하였다. PEDOT:PSS 층은 110°C에서 10분 동안 건조하였다. 질소가 충전된 글로브 박스에서 PTB7:PCBM 광활성층은 3 vol% 1-디아이오도옥탄을 함유한 클로로벤젠 용액으로부터 스핀코팅을 통해 건조된 PEDOT:PSS

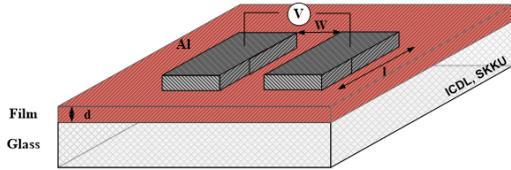


Fig. 2. Geometry of the coplanar electrodes on the samples

층 위에 증착되었다. 이때 PTB7:PCBM의 비율은 1:1.25였고, PTB7의 농도는 10 mg/ml였다. 광활성층은 70°C에서 5분간 건조되고, 진공에서 10분간 추가로 건조되었다. 이후 에탄올 분산액(0.4 wt%)으로부터 TiO₂ 전자 수송층이 4000 rpm에서 스프레이 코팅되어 활성층 위에 증착되었다. 마지막으로, 약 3×10^{-6} Torr에서 열 증착(thermal evaporation)을 통해 Al 전극이 증착되었다. 태양전지의 활성 영역은 0.20 cm²으로 ITO와 Al 전극 사이의 중첩된 영역으로 결정되었다.

전기적 특성은 유리 기판(Eagle 2000) 위에 성장된 각 층의 단일박막을 사용하였다. 코플래너 방법 Fig. 2을 사용하여 Keithley 617를 통해 측정 및 분석되었으며, 각 단일막 층위에 전극은 고진공 상태에서 알루미늄을 열증착(thermal evaporation)하여 형성하였다.

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{w}{s} = \frac{1}{\sigma_d} \cdot \frac{w}{s} \quad (1)$$

$$\sigma_d = \frac{I}{V} \cdot \frac{w}{s} = \frac{I}{V} \cdot \frac{w}{ld} \quad (2)$$

s: w간격과 l길이의 Al전극이 올라 가져 있는 면적, σ_d : 암전도도, v: 두 Al 전극 사이의 w 간격 사이에 인가된 전압, I: 두 Al 전극 사이의 w 간격 사이 흐르는 전류, ρ : 저항률, σ : 전도도, w: Al 두 전극 간 거리, d: 실리콘 박막의 두께, l: Al 전극의 길이

활성화 에너지(E_a)는 Arrhenius 방정식을 통해 온도 변화에 따른 암전도도 $\sigma_d(T)$ 변화로부터 얻었다¹⁾.

$$\sigma_d(T) = \sigma_o \exp(-E_a/k_T) \quad (3)$$

여기서, σ_o 는 전도도 선행 계수, T는 절대 온도, k는 볼츠만 상수이다. 이 $\log(\sigma(T))$ 와 $1/T$ 의 선형 관계는 근사치로, 이동도와 그에 따른 선행 계수가 온도에 약하게 의존하기 때문이다. 이와 별개로, 다양한 재료에 대해 결정된 σ_o 는 Mey-Neldel 법칙²⁾에 따라 E_a 와 상관관계를 보인다. 이러한 상관관계의 원인은 명확하지 않지만, 밴드갭 에너지의 온도 의존성 차이로 인한 것일 가능성이 크다. Stutzmann (1987)은 E_a 가 50°C < T < 160°C 범위에서 약 ±100 mV의 정확도로 결정될 수 있다고 추정한다³⁾.

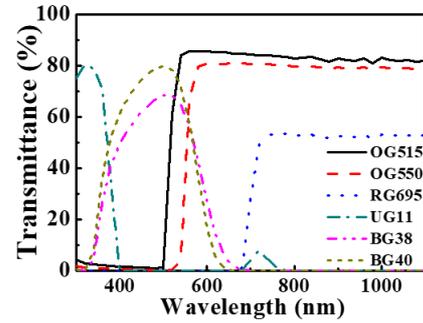


Fig. 3. Geometry of the coplanar electrodes on the samples

셀의 전류-전압(I-V) 특성은 100 mW/cm² 광원하에서 측정하였다. 태양전지의 스펙트럼 응답 특성은 트리플 접합 태양전지의 경우, 스펙트럼 응답 특성중에 다른 필터 조합이 사용된다. 일반적으로, 상부 서브셀의 측정은 OG550 필터를 사용한 백색광(할로겐 램프)으로 얻은 바이어스 광을 측정하였으며, 이 바이어스 광은 중간 및 하부 서브셀을 포화한다. 중간 서브셀은 BG38 필터를 사용한 바이어스 광으로 측정하였으며, 이 바이어스 광은 상부 및 하부 서브셀을 포화시킨다. 상부 서브셀은 UG11 필터를 사용한 백색광 하에서 바이어스 광으로 측정되며, 이 바이어스 광은 중간 및 하부 서브셀을 포화시킨다. 이 두 필터의 투과율 특성은 Fig. 3에 나타나 있다.

3. 결과 및 토의

무기 실리콘 탠덤형 태양전지(tandem solar cell) 제작에 있어서 터널 접합층(tunnel junction layer)은 매우 중요한 역할을 한다. 탠덤형 태양전지는 여러 개의 서로 다른 에너지 밴드갭을 갖는 반도체 물질을 쌓아 올려서 더 넓은 파장 범위에서 태양광을 흡수하고 변환할 수 있도록 설계된 태양전지로, 각기의 태양전지는 태양광의 서로 다른 파장대를 흡수하여 효율을 높일 수 있다.

터널 접합층의 주요 역할은 다음과 같다. 첫째로, 전류 흐름을 유지하는 역할을 한다. 각 태양전지는 p형과 n형 물질로 이루어져 있어 자체적으로 PN 접합을 이루고 있다. 상부층에서 생성된 전자와 하부층에서 생성된 전자는 서로 다른 밴드갭을 가지기 때문에 전류 흐름을 원활하게 유지하기 위해 터널접합층이 필요하다. 이 층은 상부 접합층과 하부 접합층 사이에 전자를 빠르게 이동시킬 수 있는 경로를 제공한다. 두 번째로 광학적 손실을 최소화하는 역할을 한다. 터널 접합층은 매우 얇기 때문에 입사하는 태양광의 투과는 유지하면서도 전자의 이동을 도와준다. 이로 인해 전기적 효율성을 유지하면서도 광학적 손실을 최소화할 수 있다. 마지막으로 저항을 감소하는 역할을 한다. 터널링 효과를 이용하여 전자와 정공이 접합층을 통과하는 동안 저항을 최소화하는 역할을 한다. 이를 통해 전

력 손실을 줄이고 태양전지의 전체적인 효율성을 높이는 데 기여할 수 있다.

따라서 터널 접합 층은 무기 실리콘 탠덤형 태양전지에서 각 층의 효율적인 전자 이동을 가능하게 하고, 이를 통해 보다 높은 변환 효율을 달성하는 데 중요한 역할을 한다.

3.1 터널 접합 층(Tunnel junction layer)

태양전지에서 터널 접합 층(tunnel junction layer)을 형성하는 방법은 p 타입/n타입 반도체 물질을 접합하여 전자가 터널링 현상으로 통과할 수 있도록 설계하는 것으로, 이 과정에서 핵심은 매우 얇은 두께의 접합부를 형성하여 고농도의 p형 및 n형 반도체를 만드는 것이다. 일반적으로 도핑 농도를 매우 높게 만들어 밴드갭이 좁아지고 접합 영역에서 전자가 쉽게 터널링할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 무기 실리콘 탠덤형 태양전지(tandem solar cell) 제작 시에 터널 접합 층의 n 타입 층은 비정질 실리콘 태양전지로 고정하고, 그 특성은 밴드갭(optical band gap, E_g) 및 활성화 에너지(activation Energy, E_a)값이 각각 1.79 eV, 0.16 eV 이었다. 터널 접합 층의 p 타입 층은 각각 도핑 농도를 3%, 6% 및 9%로 가변하여 그 특성을 확인하였다. Fig. 4는 무기 실리콘 탠덤형 태양전지(tandem solar cell) 제작 시에 적용된 터널 접합 층을 밴드 다이어그램을 도식화 한 것이다.

Fig. 5(a) 무기 실리콘 탠덤형 태양전지 제작 시, 터널 접합 층 증착 시, 보론 도핑 농도를 3%, 6%, 9% 변화에 따른 I-V 및 Fig. 5(b) QE 특성을 보여준다. 터널 접합 층의 p 타입 층의 도핑 농도가 3%일 때 V_{oc} 는 1.61V, 단락 전류 밀도 (short circuit current density, J_{sc}) 5.48 mA/cm², 충전률 (fill factor, ff)이 70.97%로 변환 효율 (conversion efficiency, η) 6.26% 특성을 보였다. P 타입 층의 도핑 농도가 6%일 때 V_{oc} 는 1.59V, J_{sc} 는 5.39 mA/cm², FF이 71.26%로 변환 효율 η 는 6.11% 특성을 보였다. P 타입 층의 도핑 농도가 9%일 때 V_{oc} 는 1.57V, J_{sc} 는 5.46 mA/cm², FF이 70.26%로 변환 효율 η 는 6.02% 특성을 보였다. 3개의 조건 모두 FF 값이 70% 이상 형성 되었으며, 터널 접합 층의 P 타입 층의 도핑 농도가 증가함에 따라서 하부셀에서 형성된 개방전압이(V_{oc}) 낮아져 무기 실리콘 탠덤 태양전지의

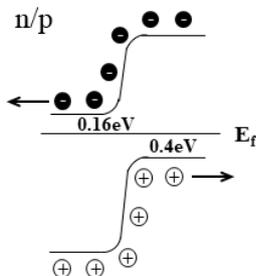


Fig. 4. Band structure of tunnel junction layer on inorganic silicon tandem junction solar cell

V_{oc} 가 약 40 mV 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 터널링 시 접합부의 과도하게 높은 도핑이 전자의 흐름을 방해하여 오히려 재결합을 높여 무기 실리콘 탠덤형 태양전지의 효율 저하로 이어진 것으로 판단된다. 보론 도핑농도가 높아질 수록 직렬 저항이 증가하는 특성을 보였는데 이는 고농도의 접합으로 터널 접합 내부에서 실제 도펀트로 작용하는 보론보다 결함으로 작용하는 도펀트가 많아짐으로 인한 것으로 판단된다. Fig. 5(b) QE 특성을 보면 터널접합층을 이루는 p층의 도핑 농도를 3%에서 9%를 증가시키에 따라서 하부로 접합에서 생성되는 전류밀도가 감소함을 확인할 수 있다. 고농도의 도핑으로 하부셀로 들어가는 태양광의 세기가 작아지기 때문에 혹은 접합부에서의 빛 흡수의 차단으로 인해 하부 접합부에서의 단락전류 밀도가 감소하여 무기 탠덤형 태양전지의 효율감소로 이었길 수 있음을 확인하였다.

3.2 고품위 진성 실리콘층(Intrinsic silicon layer)

비정질 실리콘 탠덤형 태양전지에서 고품위의 진성 실리콘 층(intrinsic silicon layer, i-layer)은 매우 중요한 역할을 한다. 비정질 실리콘 태양전지는 p형, n형 실리콘층 사이에 진성 실리콘층이 중간에 끼워져 있는 구조로 이루어져 있으며, 이 진성 실리콘층은 태양전지의 핵심 성능을 결정짓는 요소 중 하나이다. 진성 실리콘층은 전자와 정공을 생성하는 광흡수층 역할을 한다. 태양광이 비정질 실리콘 탠덤형 태양전지에 도달 하면 진성 실리콘층이 주로 태양광을 흡수하여 광전효과를 통해 전자-정공 쌍을 생성한다. 이 층은 흡수된 빛의 에너지를 전

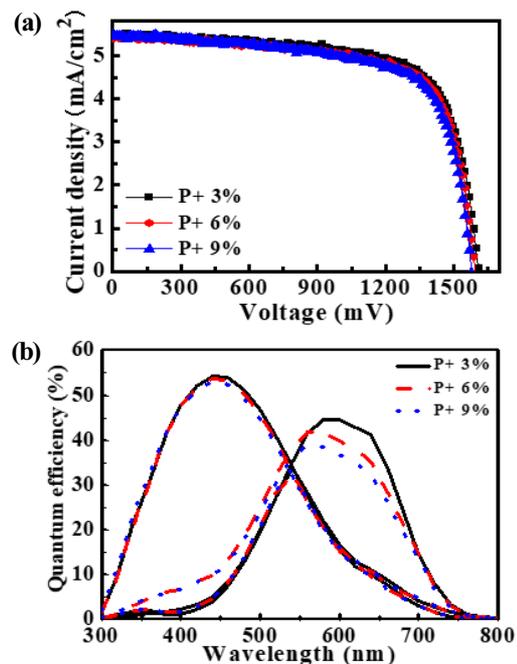


Fig. 5. (a) I-V characteristics (b) quantum efficiency of inorganic silicon tandem junction solar cell with different boron doping ratio on tunnel junction layer

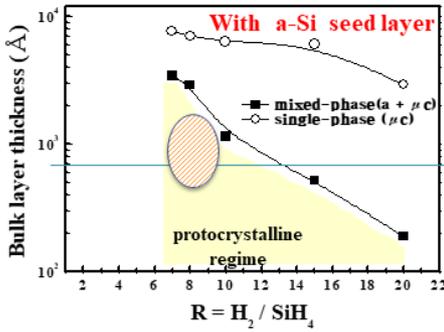


Fig. 6. Phase variation of intrinsic silicon layer with seed amorphous silicon layer with different R ratio ($R=H_2/SiH_4$) and the thickness

기 에너지로 변환하는 주요 역할을 담당하고, 고품위의 진성 실리콘층일수록 더 많은 광자를 흡수하고, 전자-정공 쌍을 더 효과적으로 생성하여 변환 효율이 증가한다. 비정질 실리콘은 구조적으로 비정질이기 때문에 결정질 실리콘보다 결합 밀도가 높은 편이다. 이는 전자와 정공이 재결합할 수 있는 가능성이 더 크다는 것을 의미한다. 하지만 고품위의 진성 실리콘층은 결합 밀도를 최소화하여 전자와 정공이 재결합되지 않고 효율적으로 이동할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 비정질 실리콘 박막을 대신하여 프로토크리스탈린 실리콘(proto crystalline silicon, pc-Si)을 이용하여 무기 실리콘 탠덤형 태양전지를 제작하였다. pc-Si는 비정질 구조 안에 작은 결정질 영역을 포함하고 있다. 이 작은 결정질 영역은 결정질 실리콘(c-Si)에서 볼 수 있는 장점을 가져온다. 결정질 구조에서는 원자들이 규칙적으로 배열되어 있어 결합 밀도가 낮고, 전하 캐리어의 이동이 더 원활하다는 장점을 가지고 있어서 비정질 실리콘보다 상대적으로 결합이 적고 전하 재결합 가능성이 줄어든다. PECVD를 이용하여 진성층 실리콘 박막 증착시에 사용되는 가스인 싸일렌(SiH_4)과 수소(H_2)의 비율을 높이면 미세결정립이 형성이 되고, 그 두께를 증가시키면 더욱 결정성분이 늘어남을 Fig. 6를 통해 확인 가능하다. 본 연구에서 사용된 조건인 $SiH_4:H_2$ 의 비가 각각 10:70, 10:80, 10:100에 따라서도 두께 약 70 nm 에서 비정질상과 결정립상이 혼재되어 있는 것을 라만 분광으로 앞선 연구에서 확인하였다⁴⁾. 진성 실리콘 층은 정확한 구조 확인을 위하여 태양전지 소자 제작 조건과 유사하게 비정질상의 씨앗층(seed layer) 약 10 nm이 형성 되어 있는 상태에서 확인하였다.

Fig. 7는 무기 실리콘 탠덤형 태양전지 제작 시, 상부 접합의 진성 실리콘층 증착 시, 싸일렌 대비 수소 농도를 10:70, 10:80, 10:90 변화에 따른 (a) I-V 및 (b) QE 특성을 보여준다. 상부 접합의 진성 실리콘층 증착 시, 싸일렌 대비 수소 농도를 10:70, 10:80, 10:90 증가시킴에 따라서 10:70일 때 V_{oc} 는 1.58V, J_{sc} 6.05 mA/cm^2 , FF는 67.14%로 η 는 6.42% 특성을 보였다. 10:80일 때 V_{oc} 는 1.57V, J_{sc} 는 6.22 mA/cm^2 , FF이 66.26%로 변

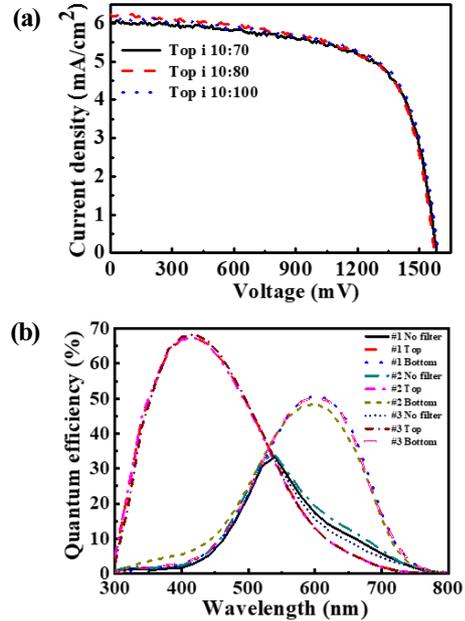


Fig. 7. (a) I-V characteristics (b) quantum efficiency of inorganic silicon tandem junction solar cell with different R ratio on the intrinsic layer

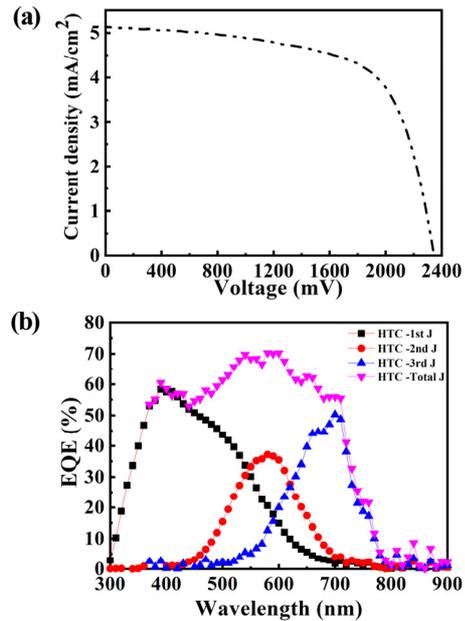


Fig. 8. (a) I-V characteristics (b) quantum efficiency of inorganic-organic triple-junction solar cell ($E_{top} = 1.83 eV$, $E_{middle} = 1.80 eV$, $E_{bottom opt} = 1.30 eV$)

환 효율 η 는 6.47% 특성을 보였다. 10:90일 때 V_{oc} 는 1.59V, J_{sc} 는 6.16 mA/cm^2 , FF이 67.12%로 변환 효율 η 는 6.02% 특성을 보였다. 앞서 터널 접합층 최적화 시 적용된 진성 실리콘층은 일반적인 비정질 상만 존재하는 조건으로서 상대적으로 고품위의 진성층을 상부 접합 태양전지에 적용함으로써 단락전류 밀도 향상으로 조금 더 개선된 효율을 얻을 수 있었다.

3.3 유·무기 하이브리드 3중 접합 태양 전지

유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지는 앞서 연구된 3.1 및 3.2에서 연구된 결과인 터널 접합 층 p층의 보론 도핑 농도 3%, 상부 접합 태양전지의 진성층 증착 시 $\text{SiH}_4:\text{H}_2$ 의 비 10:70의 조건을 적용하여 제작되었다. Fig. 8은 유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지의 (a) I-V 특성과 (b) QE 특성을 보여주는 그래프로, 유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지 V_{oc} 는 2.34V, J_{sc} 는 5.13 mA/cm^2 , FF이 64.93%, η 가 7.81%로, 앞서 제작된 무기 실리콘 탠덤 태양전지의 효율보다 약 1.4% 향상된 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구는 유무기 하이브리드 다중 접합 태양전지에 적용하기 위한 비정질 실리콘을 기반으로 한 탠덤형 태양전지에서 고농도의 보론도핑된 비정질 실리콘 박막의 재결합 층 적용과 고품위의 비정질 실리콘 박막을 적용하여, 유·무기 하이브리드 3중 접합 태양전지 V_{oc} 는 2.34V, J_{sc} 는 5.13 mA/cm^2 , FF이 64.93%, η 가 7.81%인 특성을 얻어 무기 실리콘 탠덤형 태양전지 특성보다 약 20% 효율 이득을 얻을 수 있었다. 본 구조를 이용한 삼중접합 태양전지의 제작은 저렴한 유기물질을 하부 접합부에 적용하여 태양전지 제작 단가 감축과 동시에 효율 향상이라는 결과를 얻을 수 있는 시도였다.

후 기

본 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20224000000070, 스마트 에너지신산업 클러스터 인재양성)과 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(RS-2024-00394769).

Reference

1. R. E. I. Schropp, M. Zeman, Amorphous and microcrystalline silicon solar cells: Modeling, materials and device technology. First ed. Kluwer Academy Publishers. 44-45 (1998).
2. A. Dalvi, N. P. Reddy, S. C. Agarwal, The Meyer-Neldel rule and hopping conduction. Solid State Commun. 152, 612-615 (2012).
3. M. Stutzman, D. K. Biegelsen, R. A. Street, Detailed investigation of doping in hydrogenated amorphous silicon and germanium. Phys. Rev. B. 35, 5666-5701 (1987).
4. C. Shin, S. M. Iftiqar, J. Park, S. Baek, J. Jang, M. Kim, J. Jung, Y. Lee, S. Kim, J. Yi, Control of micro void fraction and optical band gap in intrinsic amorphous silicon thin films (VHF-PECVD) for solar cell application. Mater. Res. Bull. 60, 895-899 (2014).