

# InGaP/GaAs 이중접합 기반의 고효율 플렉시블 태양전지 제조기술 연구

문승필<sup>1)</sup> · 김영조<sup>2)</sup> · 김강호<sup>2)</sup> · 김창주<sup>2)</sup> · 정상현<sup>2)</sup> · 신현범<sup>2)</sup> · 박경호<sup>2)</sup> · 박원규<sup>2)</sup> · 안연식<sup>1)</sup> · 강호관<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국전력공사 전력연구원, 나주시, 58217

<sup>2)</sup>한국나노기술원, 수원시, 16229

## Flexible InGaP/GaAs Double-Junction Solar Cells Transferred onto Thin Metal Film

Seungpil Moon<sup>1)</sup> · Youngjo Kim<sup>2)</sup> · Kangho Kim<sup>2)</sup> · Chang Zoo Kim<sup>2)</sup> · Sang Hyun Jung<sup>2)</sup> · Hyun-Beom Shin<sup>2)</sup> · Kyung Ho Park<sup>2)</sup> · Won-Kyu Park<sup>2)</sup> · Yeon-Shik Ahn<sup>1)</sup> · Ho Kwan Kang<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>KEPCO Research Institute, Naju, 58217, Korea

<sup>2)</sup>Korea Advanced Nano Fab Center, Suwon, 16229, Korea

**ABSTRACT:** III-V compound semiconductor based thin film solar cells promise relatively higher power conversion efficiencies and better device reliability. In general, the thin film III-V solar cells are fabricated by an epitaxial lift-off process, which requires an  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x \geq 0.8$ ) sacrificial layer and an inverted solar cell structure. However, the device performance of the inversely grown solar cell could be degraded due to the different internal diffusion conditions. In this study, InGaP/GaAs double-junction solar cells are inversely grown by MOCVD on GaAs (100) substrates. The thickness of the GaAs base layer is reduced to minimize the thermal budget during the growth. A wide band gap p-AlGaAs/n-InGaP tunnel junction structure is employed to connect the two subcells with minimal electrical loss. The solar cell structures are transferred on to thin metal films formed by Au electroplating. An AlAs layer with a thickness of 20 nm is used as a sacrificial layer, which is removed by a HF:Acetone (1:1) solution during the epitaxial lift-off process. As a result, the flexible InGaP/GaAs solar cell was fabricated successfully with an efficiency of 27.79% under AM1.5G illumination. The efficiency was kept at almost the same value after bending tests of 1,000 cycles with a radius of curvature of 10 mm.

**Key words:** Flexible, Thin film, Solar cell, MOCVD, Epitaxial lift-off

### Nomenclature

PCE : power conversion efficiency, %

CPV : concentrated photovoltaics

IMM : inverted metamorphic

ELO : epitaxial lift-off

AM1.5G : air mass 1.5 global

BSF : back surface field

TJ : tunnel junction

MOCVD : metal organic chemical vapor deposition

UHP H<sub>2</sub> : ultra-high purity hydrogen

TMGa : trimethylgallium

TMIn : trimethylindium

AsH<sub>3</sub> : arsine

PH<sub>3</sub> : phosphine

DEZn : diethylzinc

CBr<sub>4</sub> : carbon tetrabromide

SiH<sub>4</sub> : silane

DETe : diethyltellurium

ARC : anti-reflection coating

PCB : printed circuit board

EQE : external quantum efficiency, %

SEM : scanning electron microscope

J<sub>sc</sub> : short-circuit current density, mA/cm<sup>2</sup>

V<sub>oc</sub> : open circuit voltage, V

FF : fill factor, %

\*Corresponding author: hokwan.kang@kanc.re.kr

Received August 30, 2016; Revised September 5, 2016;

Accepted September 7, 2016

© 2016 by Korea Photovoltaic Society

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.

## 1. 서론

III-V 화합물 반도체 태양전지는 재료 자체의 물성이 우수하고, 다중접합 구조 구현이 용이하여 다른 종류의 태양전지에 비해 월등히 높은 광전변환효율(PCE) 특성을 보여준다<sup>1)</sup>. 현재 삼중접합 구조의 InGaP/GaAs/Ge 태양전지가 상용화되어 있으며, 주로 인공위성용 태양광 패널이나 집광형 태양광 발전(CPV) 시스템의 핵심 부품으로 응용되고 있다<sup>2)</sup>. 최근에는 소형 인공위성과 고고도용 무인 항공기, 다목적 드론 등 소형 항공우주 산업이 발전함에 따라, 유연형 기체에 부착 가능한 플렉시블 박막 형태의 고효율 III-V 태양전지 제조기술이 연구되고 있다<sup>3-5)</sup>.

현재까지 개발된 대부분의 플렉시블 태양전지는 저가형 소재를 기반으로 제작되어 효율이 낮거나, 소자 안정성이 떨어지는 문제점이 있다<sup>6)</sup>. 따라서 상대적으로 효율이 높고 신뢰성이 우수한 III-V 태양전지를 얇은 필름 형태로 제작하여, 유연성을 부가하고 경량화하는 방법이 설치 면적의 제한을 받는 플렉시블 태양전지 제품의 활용도를 높이고 상용화 시기를 앞당길 수 있는 대안이 될 수 있다.

위성용 및 CPV용 InGaP/GaAs/Ge 태양전지는 대부분 Ge 기판을 하부 셀로 사용하여 벌크 형태로 제작되기 때문에<sup>7)</sup>, 제조비용이 높고 박막형 소자 구현이 어렵다. 하지만 최근 III-V 에피층과 GaAs 기판을 분리하는 기판 박리(ELO) 공정 기술 관련 연구가 확대되면서, 플렉시블 박막 형태의 III-V 태양전지 소자 제작 및 저가화 가능성이 입증되고 있다<sup>8)</sup>. 특히, ELO 공정을 기반으로 제작되는 역변성(IMM) 구조의 InGaP/GaAs/InGaAs 태양전지는 AM1.5G 1 sun 조건에서 37% 이상의 초고효율 달성이 가능한 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>.

ELO 기술의 핵심은 III-V 에피층과 GaAs 기판 사이에 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (x ≥ 0.8) 희생층을 삽입하고 HF 용액을 이용하여 선택적으로 식각하는 것이다. ELO 공정 적용 시 태양전지 에피층을 역방향으로 성장하는 것이 일반적이는데, 이 경우 에피층 내부의 원자 확산 조건 변화로 소자 특성 저하 문제가 발생할 수 있다<sup>3)</sup>. 따라서 고효율 플렉시블 III-V 태양전지 제작을 위해서는 역방향 에피성장 조건 최적화가 우선적으로 연구되어야 한다.

본 연구에서는 MOCVD 에피성장 기술을 이용하여 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지 구조를 역방향으로 성장하고, 2인치 웨이퍼 기반의 ELO 공정을 적용하여 박막형 태양전지 소자를 제작하였다. 특히, 에피성장 순서 변경에 따른 소자특성을 비교 분석하고, MOCVD 성장 조건을 최적화하여 고효율 플렉시블 InGaP/GaAs 태양전지를 제작하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 역방향 구조의 태양전지 에피성장

박막형 InGaP/GaAs 태양전지 제작을 위해 Fig. 1과 같이 p-type GaAs (100) 기판 위에 AlAs 기반의 희생층 구조를 성장한 후, 태양전지 에피층을 역방향으로 성장(inverted growth) 하였다. 각각의 태양전지 셀은 emitter/base p-n 접합 층과 캐리어 재결합 방지를 위한 window 및 BSF 층으로 구성되며, 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> 이상의 고농도로 도핑된 p-GaAs/n-GaAs 터널접합(TJ) 구조에 의해 전기적으로 연결된다. GaAs 물질로 성장된 최상층 및 최하층은 금속 전극과의 저항 접촉(ohmic contact) 형성을 위해 5 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> 이상의 도핑농도를 갖는다.

모든 에피층은 MOCVD (AIXTRON: 2600 G3) 단일 챔버 내에서 성장되었다. 고순도로 정제된 수소(UHP H<sub>2</sub>)를 캐리어 가스로 사용하였으며, 챔버 압력을 50 mbar로 일정하게 유지하였다. TMGa, TMIIn 유기금속 소스와 AsH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub> 가스 소스를 각각 3족과 5족 반응 물질로 사용하였으며, DEZn와 CBr<sub>4</sub>를 p-type 불순물로 SiH<sub>4</sub>와 DETe를 n-type 불순물로 사용하였다. 각각의 에피층은 도핑조건에 따라 550~720°C의 온도 범위에서 성장되었다.

### 2.2 박막형 태양전지 소자 제작

역방향으로 성장된 InGaP/GaAs 태양전지 에피웨이퍼를 기반으로 Fig. 2와 같은 소자 제작 공정을 적용하여 셀 면적 5.5 × 5.5 mm<sup>2</sup>의 박막형 태양전지를 제작하였다.

첫 번째로 전도성 유연 기판 제작을 위해 전해도금 기술을 이용하여 태양전지 에피웨이퍼 표면에 금속 박막을 형성하였다. 안정성이 우수한 Au 물질을 사용하였으며, 박막 두께를 30 μm로 얇게 도금하여 유연성을 확보하였다.

두 번째로 ELO 공정을 적용하여 태양전지 에피층을 GaAs 기판으로부터 분리하였다. ELO 공정 속도 향상을 위해 AlAs 희생층을 20 nm 두께로 얇게 성장하였으며, HF:Acetone (1:1)

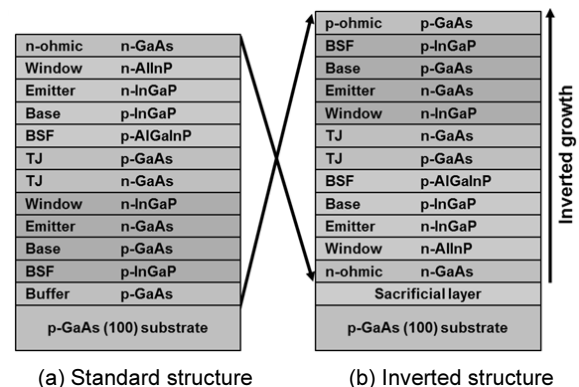
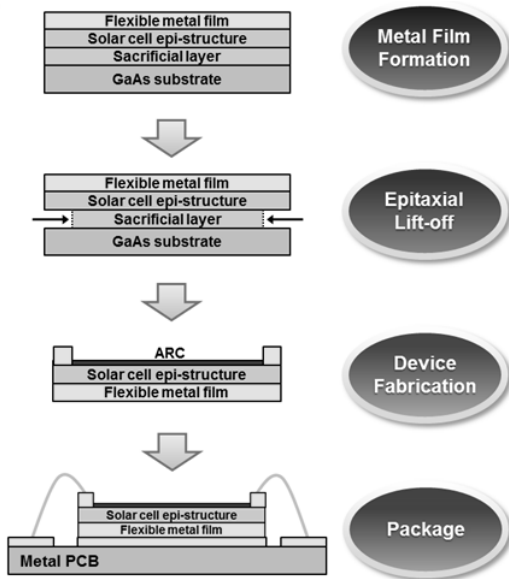


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) standard and (b) inverted InGaP/GaAs solar cell epi-structures



**Fig. 2.** Illustrations of the fabrication process for the thin film InGaP/GaAs solar cell

**Table 1.** MOCVD growth conditions of standard and inverted InGaP/GaAs solar cell epi-structures

Cell	Growth direction	Base thickness (nm)		TJ structure
		InGaP	GaAs	
A	Standard	500	3500	p-GaAs/n-GaAs
B	Inverted	1000	3500	p-GaAs/n-GaAs
C	Inverted	1000	1500	p-GaAs/n-GaAs
D	Inverted	1000	1500	p-AlGaAs/n-InGaP

혼합 용액을 이용하여 식각하였다<sup>10)</sup>.

세 번째로 분리된 태양전지 에피웨이퍼 표면에 전면 전극을 패터닝하고, 반사방지막(ARC)을 증착하여 표면 반사에 의한 태양광 흡수 손실을 최소화 하였다.

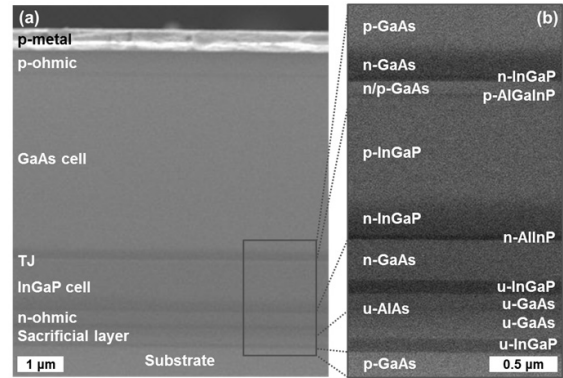
마지막으로 mesa isolation 및 dicing 공정을 이용하여 각각의 태양전지 셀을 분리한 후, 금속 PCB에 부착하고 Au wire로 연결하여 package를 완료하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 에피성장 방향에 따른 InGaP/GaAs 태양전지 특성 변화

에피성장 방향에 따른 InGaP/GaAs 태양전지의 소자 특성 변화를 분석하기 위해, Table 1과 같이 4가지 조건으로 성장된 InGaP/GaAs 태양전지의 광전변환효율 및 양자효율(EQE) 특성을 비교하였다.

셀 A는 Fig. 1(a)과 같이 정방향으로 성장된 벌크형 태양전지이며, 셀 B, C, D는 Fig. 1(b)과 같이 역방향으로 성장된 박막형 태양전지이다. 박막형 태양전지의 경우, 내부 확산 조



**Fig. 3.** Cross sectional SEM images of the fabricated thin film InGaP/GaAs solar cell

**Table 2.** Photovoltaic device parameters of the fabricated InGaP/GaAs solar cells under AM1.5G illumination

Cell	PCE (%)	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
A	28.01	2.33	13.77	87.30
B	17.41	2.33	8.83	84.54
C	21.30	2.34	10.50	86.65
D	25.21	2.32	12.58	86.39

건 변화에 따른 InGaP 셀 특성 저하를 고려하여<sup>3)</sup> InGaP base 두께를 500 nm에서 1,000 nm로 증가시켰다. 박막형 태양전지 소자의 성능 개선을 위해, 셀 C와 D는 GaAs base 두께를 3,500 nm에서 1,500 nm로 감소시켰으며, 셀 D는 밴드갭이 상대적으로 큰 AlGaAs, InGaP 기반의 터널접합 구조를 적용하였다.

역방향으로 성장한 박막형 InGaP/GaAs 태양전지의 구조 분석을 위해 SEM 측정 장비를 이용하여 소자 단면을 분석하였다. Fig. 3은 전해도금 공정 전 박막형 셀 B의 SEM 단면 분석 이미지이다. Fig. 3(a)을 보면 Fig. 1(b)과 같은 박막형 태양전지 에피층이 잘 성장되어 각각의 계면이 명확하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 확대 이미지인 Fig. 3(b)에서 희생층 구조를 보다 자세히 관찰할 수 있는데, u-GaAs, u-InGaP 버퍼층이 u-AlAs 희생층 위아래로 성장된 것을 알 수 있다. 해당 버퍼층은 태양전지 에피층과 기판의 표면 손상 방지를 위한 보호 목적으로 삽입되었으며<sup>8,10)</sup>, ELO 공정 후 선택적 식각 방법으로 제거되었다.

제작한 InGaP/GaAs 태양전지의 광전변환효율 특성은 class A 등급의 solar simulator (Wacom: WXS-220S-L2) 장비를 이용하여 AM1.5G (1,000 W/m<sup>2</sup>) 표준 스펙트럼 조건에서 측정하였으며, 양자효율 특성은 측정 오차가 2% 이내인 태양전지 양자효율 측정 장비(PV measurement: QEX7)를 이용하여 측정하였다.

벌크형 및 박막형 InGaP/GaAs 태양전지의 광전변환효율 특성과 J-V 곡선을 Table 2와 Fig. 4에 각각 나타내었다. 측정

결과를 살펴보면 박막형 셀 B, C, D의 효율이 벌크형 셀 A에 비해 낮은 것을 알 수 있는데, 단락회로 전류 밀도( $J_{sc}$ )의 저하가 주요 요인으로 확인된다. 반면에 개방회로 전압( $V_{oc}$ )과 충전률(FF)이 크게 저하되지 않았기 때문에, Fig. 2의 박막형 소자 제작 공정이 박막형 태양전지 소자 특성 저하에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석된다.

태양전지의  $J_{sc}$ 와 직접적으로 연관이 있는 양자효율 측정 결과에서도 Fig. 5와 같이 박막형 태양전지의 특성 저하 현상이 확인된다. 특히, 500 nm 이하 단파장 영역에서의 양자효율 특성 저하가 두드러지는데, 해당 영역은 InGaP emitter 층의 두께 및 도핑농도, 공핍폭, 소수 캐리어 확산 길이에 직접적인 영향을 받는 영역이다<sup>11)</sup>. 따라서 InGaP/GaAs 태양전지 에피층을 역방향으로 성장할 경우 InGaP 셀의 emitter 영역 특성이 변화하는 것으로 유추할 수 있다.

InGaP 셀 특성 변화의 주요 요인은 역방향 에피성장애 따른 고온 노출 시간의 증가로 알려져 있다<sup>3)</sup>. 3,500 nm로 두꺼운 GaAs 셀을 성장하는 동안 InGaP 셀 내부에서 Si, Zn 등의 불순물 확산 현상이 심화되면서, emitter 영역의 두께와 도핑농도가 변화하는 것이다. 이러한 내부 확산 효과를 최소화하기 위해, 박막형 셀 C와 D에서는 GaAs base 두께를 1,500 nm로 줄여 InGaP 셀의 고온 노출 시간을 50% 이하로 감소시켰다. Table 2에서 박막형 셀 B와 C의 광전변환효율 특성을 비교해

보면, GaAs base 두께 감소 효과로  $J_{sc}$ 가 19%까지 향상된 것을 알 수 있다.

고온 노출 시간의 증가는 InGaP 셀 특성 저하 문제 외에도 터널접합 특성 저하 문제를 야기할 수 있다. 터널접합 층의 불순물 확산 현상으로 인해 도핑 농도가 감소하고, 에피결합 밀도가 증가하여 터널링 확률이 낮아지는 것이다<sup>12)</sup>. Fig. 5에서 박막형 셀 C의 양자효율 특성을 살펴보면, InGaP 셀과 GaAs 셀의 양자효율이 동일하게 낮은 수준으로 제한되는데, 이를 터널링 확률 감소에 의한 결과로 분석할 수 있다.

이러한 터널접합 특성 저하 문제를 최소화하기 위해, 박막형 셀 D에서는 밴드갭이 상대적으로 큰 p-AlGaAs/n-InGaP 터널접합 구조를 적용하여 내부 확산 효과를 억제하였다. 그 결과, 박막형 셀 D의 양자효율 특성이 전체적으로 개선되었으며,  $J_{sc}$ 가 벌크형 셀 A의 91% 수준까지 향상되었다. Fig. 5에서 InGaP 셀 흡수 영역(300~650 nm) 특성을 살펴보면, 벌크형 셀 A과 박막형 셀 D의 양자효율 곡선이 540 nm 지점에서 서로 교차하는 것을 알 수 있다. 따라서 두 셀이 유사한  $J_{sc}$  특성을 보이는 것은 역방향 에피성장애 따른 단파장 특성 저하와 base 두께 증가에 따른 장파장 특성 개선의 효과가 함께 작용한 결과로 분석할 수 있다<sup>11)</sup>.

### 3.2 플렉시블 박막형 InGaP/GaAs 태양전지 소자 특성

InGaP/GaAs 태양전지의 역방향 에피성장 실험 결과를 바탕으로 2인치 웨이퍼 기반의 ELO 공정 기술을 적용하여, Fig. 6과 같은 플렉시블 박막형 InGaP/GaAs 태양전지 웨이퍼를 제작하였다. Fig. 6(a)은 전해도금 공정 후 태양전지 웨이퍼의 후면 사진이며, Fig. 6(b)은 ELO 공정 후 태양전지 웨이퍼의 전면 사진이다.

유연 기판 형성을 위한 전해도금 공정 과정에서 5 mm 두께의 원형 피가 형성되어 약간의 면적 손실이 발생하였으나, 2인치 웨이퍼 한 장당 약 20개 정도의 박막형 태양전지 셀 (5.5×5.5 mm<sup>2</sup>) 제작이 가능했다. 특히, 30 μm 두께의 얇은 Au 박막을 대체 기판으로 사용한 결과, Fig. 6(c)과 같은 유연성을 확보할 수 있었다.

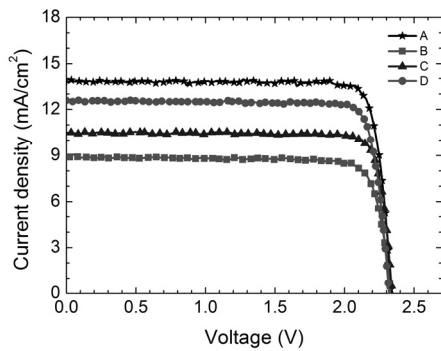


Fig. 4. Photovoltaic J-V curves of the fabricated InGaP/GaAs solar cells under AM1.5G illumination

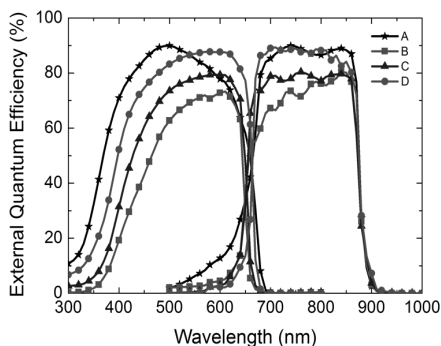


Fig. 5. External quantum efficiencies of the fabricated InGaP/GaAs solar cells

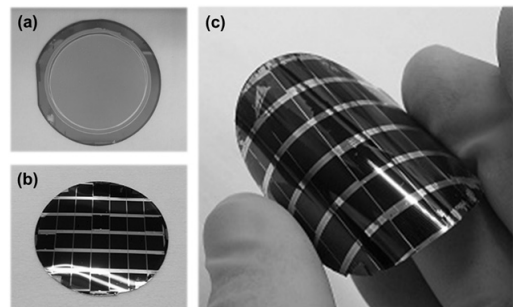
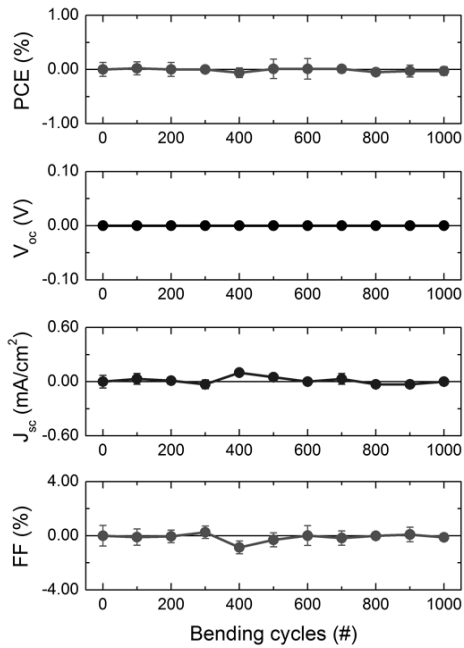
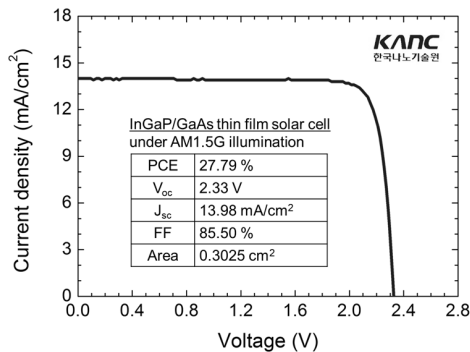


Fig. 6. Photographs of the flexible thin film InGaP/GaAs solar cell wafer



**Fig. 7.** Bending test results of the flexible thin film InGaP/GaAs solar cell under AM1.5G illumination



**Fig. 8.** Photovoltaic J-V curve and device parameters of the flexible thin film InGaP/GaAs solar cell under AM1.5G illumination

Fig. 7은 제작한 플렉시블 박막형 InGaP/GaAs 태양전지의 굽힘 테스트 결과이다. 곡률반경 10 mm 조건으로 태양전지 웨이퍼를 반복적으로 구부리고, 이에 따른 PCE,  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF의 변화를 관찰하였다. 굽힘 테스트 전의 효율 측정 결과를 기준으로 모든 특성 인자의 변화량이  $\pm 1\%$  이내로 매우 작았으며, 1,000회의 굽힘 테스트 후에도 PCE 감소량은 0.03%로 안정적인 동작 특성을 확인하였다. 따라서 굽힘 테스트 시 기계적 손상에 의한 태양전지의 효율 저하 현상은 거의 없는 것으로 분석된다.

Fig. 8은 최적조건으로 제작된 플렉시블 박막형 InGaP/GaAs 태양전지의 J-V 곡선 및 광전변환효율 특성을 보여준다. 각 에피층의 두께와 도핑농도를 최적화하고, InGaP 셀과 GaAs 셀의 전류정합 구조를 구현하였으며, 전면 전극 구조를 최적화하여 태양전지의 광흡수율을 극대화하였다. 결과적으로 플

렉시블 박막형 InGaP/GaAs 태양전지의  $J_{sc}$ 를 13.98 mA/cm<sup>2</sup>까지 향상시켰으며, 27.79%의 광전변환효율을 달성하였다. 이는 벌크형 InGaP/GaAs 태양전지의 효율(28.01%)과 유사한 수준으로, 웨이퍼 기반의 플렉시블 박막형 III-V 태양전지 제작 가능성을 입증했다는 점에서 의미가 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 MOCVD 에피성장 기술과 ELO 공정 기술을 이용하여 고효율 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지를 플렉시블 박막 형태로 제작하였다. 특히, 태양전지 에피층을 역방향으로 성장함에 따라 발생 가능한 소자 특성 저하 문제를 실험적으로 분석하였으며, 전도성 유연 기판을 형성을 위한 Au 전해도금 기술과 2인치 웨이퍼 기반의 ELO 공정 기술을 연구하였다. 결과적으로 27.79% 효율의 박막형 InGaP/GaAs 태양전지 소자를 성공적으로 제작하여, 2인치 웨이퍼 기반의 플렉시블 III-V 태양전지 제작 가능성을 입증하였다.

MOCVD 기반의 역방향 에피성장 기술은 III-V 태양전지 고효율화를 위한 다중접합 기술로 응용될 수 있으며, 2인치 웨이퍼 기반의 ELO 공정 기술은 III-V 태양전지 저가화를 위한 기판 재사용 기술로 응용 가능하다. 특히, 플렉시블 박막형 III-V 태양전지 기술은 설치 면적의 제한을 받는 휴대용 기기나 항공기, 자동차, 선박 등 모바일 응용 분야에 적극 활용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 일부 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 20123010010110)

## References

- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. D., "Solar cell efficiency tables (version 47)," *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, Vol. 24, pp. 3-11, 2016.
- Chiu, P. T., Law, D. C., Woo, R. L., Singer, S. B., Bhusari, D., Hong, W. D., Zakaria, A., Boisvert, J., Mesropian, S., King, R. R., Karam, N. H., "Direct semiconductor bonded 5J cell for space and terrestrial applications," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 4, No. 1, pp. 493-497, 2014.
- Bauhuis, G. J., Mulder, P., Haverkamp, E. J., Schermer, J. J., Nash, L. J., Fulgoni, D. J. F., Ballard, I. M., Duggan, G., "Inverted thin film InGaP/GaAs tandem solar cells for CPV applications using epitaxial lift off," *35th IEEE Photovoltaic*

- Specialists Conference, pp. 1243-1247, 20-25 June 2010, Honolulu, USA.
4. Youtsey, C., Adams, J., Chan, R., Elarde, V., Hillier, G., Osowski, M., McCallum, D., Miyamoto, H., Pan, N., Stender, C., Tatavarti, R., Tuminello, F., Wibowo, A., "Epitaxial lift-off of large-area GaAs thin-film multi-junction solar cells," CS MANTECH Conference, 23-26 April 2012, Boston, USA.
  5. Mattos, L. S., Scully, S. R., Syfu, M., Olson, E., Yang, L., Ling, C., Kayes, B. M., He, G., "New module efficiency record: 23.5% under 1-sun illumination using thin-film single-junction GaAs solar cells," 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 3187-3190, 3-8 June 2012, Austin, USA.
  6. Pagliaro, M., Ciriminna, R., Palmisano, G., "Flexible solar cells," *ChemSusChem*, Vol. 1, No. 11, pp. 880-891, 2008.
  7. Friedman, D. J., Olson, J. M., "Analysis of Ge junctions for GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 9, No. 3, pp. 179-189, 2001.
  8. Lee, K., Zimmerman, J. D., Hughes, T. W., Forrest, S. R., "Non-destructive wafer recycling for low-cost thin-film flexible optoelectronics," *Advanced Functional Materials*, Vol. 24, No. 27, pp. 4284-4291, 2014.
  9. Sasaki, K., Agui, T., Nakaido, K., Takahashi, N., Onitsuka, R., Takamoto, T., "Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1556, pp. 22-25, 2013.
  10. Wu, F. L., Ou, S. L., Horng, R. H., Kao, Y. C., "Improvement in separation rate of epitaxial lift-off by hydrophilic solvent for GaAs solar cell applications," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 122, pp. 233-240, 2014.
  11. Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H., Karam, N., "III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics," *Energy & Environmental Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 174-192, 2009.
  12. García, I., Rey-Stolle, I., Algora, C., "Performance analysis of AlGaAs/GaAs tunnel junctions for ultra-high concentration photovoltaics," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 45, No. 4, pp. 045101, 2012.