

# 집광 조건에서의 GaInP/AlGaInP 이종접합 구조 태양전지 특성 연구

김정환<sup>†</sup>

세종대학교 에너지자원공학과  
(2019년 6월 10일 접수, 2019년 6월 12일 심사, 2019년 6월 17일 채택)

## Study on the Characteristics of GaInP/AlGaInP Heterojunction Photovoltaic Cells under Concentrated Illumination

Junghwan Kim<sup>†</sup>

Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Republic of Korea  
(Received June 10, 2019; Revised June 12, 2019; Accepted June 17, 2019)

### 초 록

GaInP/AlGaInP 이종접합 구조를 제안하고 집광 조건에서 가장 높은 효율을 달성한 III-V 화합물 반도체 다중접합 태양전지의 맨 위 subcell에 주로 사용되는 GaInP 동중접합 구조를 대체해 이종접합 구조가 응용될 가능성에 대하여 조사하였다. 2° off 된 웨이퍼와 10° off 된 서로 다른 off-cut 방향을 갖는 두 종류의 GaAs 기판 위에 성장된 태양전지의 특성을 집광 조건에서 측정하고 비교하였다. 10° off 된 태양전지에서 더 높은 단락전류와 변환효율을 얻었다. 1 sun 조건에서 10° off 된 기판 위에 제작된 2 × 2 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지에서 9.21 mA/cm<sup>2</sup>의 단락전류밀도와 1.38 V의 개방전압이 측정되었다. 10° off 기판 위에 제작된 5 × 5 mm<sup>2</sup> 태양전지에서 집광도 증가에 따라 곡선인자(fill factor)가 감소하여 변환효율은 6.03% (1 sun)에서 5.28% (20 sun)로 측정되었다.

### Abstract

The feasibility of replacing the top cell of pn GaInP homojunction with our GaInP/AlGaInP heterojunction structure in III-V semiconductor multijunction photovoltaic (MJPV) cells having the highest current conversion efficiency was investigated. The performance of photovoltaic (PV) cells grown on 2° and 10° off-oriented GaAs substrates were compared to each other. The PV cells on the 10° off-cut substrate showed higher short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) and conversion efficiency values than that of using the 2° one. For 2 × 2 mm<sup>2</sup> area PV cell on 10° off substrate, the  $J_{sc}$  of 9.21 mA/cm<sup>2</sup> and the open-circuit voltage of 1.38 V were measured under 1 sun illumination. For 5 × 5 mm<sup>2</sup> cell on 10° off substrate, the conversion efficiency was decreased from 6.03% (1 sun) to 5.28% (20 sun) due to a decrease in fill factor (FF).

**Keywords:** Solar cells, Concentrated photovoltaics, Heterojunction, Compound semiconductors

## 1. 서 론

태양광 발전이 대규모 발전시설에 사용되고 그리드 패리티(grid parity)를 달성하기 위해서는 집광형 태양전지(concentrator photovoltaic) 시스템을 통하여 태양전지 면적을 줄임으로써 셀 생산단가를 낮추고 집광도를 높여 태양광 발전의 균등화 발전비용(levelized cost of electricity)을 낮추어야 된다[1]. 이러한 경제성을 달성하기 위해서는 300~1,000배의 고집광이 요구되는데 현재 태양광 패널의 대부분을 차지하는 실리콘은 간접전이형 밴드갭을 갖기 때문에 100배 이상의 집

광형에는 사용되기 어렵다. 고집광형 태양전지(high concentration PV)로는 보통 직접전이형 밴드갭을 갖는 III-V 화합물 반도체 태양전지가 가장 유망하다[2,3]. 고집광 대규모 발전에서 III-V 화합물 반도체 태양전지를 사용할 경우 최저 LCOE이 달성될 수 있다고 예측되었다[4]. 고집광형 모듈 또는 시스템에서는 서로 다른 밴드갭 에너지를 갖는 반도체를 적층하여 넓은 태양광 스펙트럼영역에 반응하고 단락 전류 전압을 증가시킬 수 있는 다중접합 태양전지(multi-junction photovoltaic cell)를 사용한다. 다중접합 태양전지에는 GaInP, GaAs, InGaAs, Ge 등의 반도체가 사용되는데 이런 반도체 물질의 pn 접합으로 이루어진 각각의 sub cell들은 높은 도핑 농도의 p-n 접합으로 이루어진 터널접합(tunnel junction)을 각각의 sub cell의 사이에 넣어 적층한다. 사중 접합(4-junction) 태양전지에서는 집광 조건(327 suns)에서 43%의 효율이 보고되었다[5,6]. 다중접합 전지는 가장 높은 효율을 얻을 수 있지만 에피층의 성장이 복잡하다. 그리고 총 변환 전류는 가장 낮은 전류를 발생시키는 서브 셀에 의해 제한되기 때문에 각 서브 셀에서

<sup>†</sup> Corresponding Author: Sejong University,  
Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Seoul 05006,  
Republic of Korea  
Tel: +82-2-3408-3978 e-mail: junghwan@sejong.ac.kr

생성되는 광전류가 일치하도록 설계되어야 한다. 이처럼 다중 접합 태양전지는 서로 다른 밴드갭의 반도체를 적층하여야 하기 때문에 격자상수 차이(lattice mismatch)에 의한 변형(strain)에 대해서도 고려되어야 한다[7,8]. 격자상수의 차이가 큰 경우 서로 다른 기판(위에 태양전지를 만들고 이를 기판의 접합(wafer bonding)을 통해 다중접합 셀을 제작하는 방법도 보고되었다[9,10]. 따라서 III-V 화합물 태양전지가 실제 발전시설에서 응용되기 위해서는 좀 더 단순한 구조를 갖는 에피 구조를 통한 효율개선이 추구되어야 할 필요성이 있다.

GaInP는 보통 밴드갭이 가장 큰 top cell로 가장 일반적으로 선택되는 물질이고 AlGaInP는 다중 접합 태양전지에서 대부분의 빛을 투과시키는 입사광 창층(window layer)으로 선택되는 물질이다. 현재까지 대부분의 연구는 각 서브 셀들이 동중접합 구조를 갖는 구조에 대한 연구가 주를 이루었다. 이 연구에서는 GaInP pn 동중접합(homojunction) 대신 p-GaInP/N-AlGaInP 이중접합을 제안하였다. 고분자 태양전지에서는 이러한 이중접합(bulk heterojunction)이 가장 고효율을 얻는 구조로 적용되고 있다[11]. 기존의 단일 p-n 접합에서는 태양광에 의해 생성된 전자-양공이 공핍층(depletion region)에서 주로 생성된다. 입사광의 세기가 매우 큰 집광형 태양광의 경우 단일 p-n 접합에서는 증가된 입사광에 의해 공핍층(depletion region)에 생성된 전자-양공의 수가 증가하게 되고 charge screen 효과가 훨씬 커진다. 따라서 전자의 이동이 느려지게 되면 재결합의 확률이 커지므로 전류 변환효율이 낮아지게 된다. 이러한 공핍층에서의 재결합을 Sah-Noyce-Shockley 재결합이라고 한다[12]. 염료감응형 태양전지에서도 전극의 도핑을 통해 재결합을 줄여 변환효율을 증가시킨 연구가 보고되었다[13]. 이 연구의 GaInP/AlGaInP 이중접합은 생성된 전자가 n층을 통과하는 동안에 이 층에서 태양광에 의해 전자-양공이 생성이 거의 없게 하면 전자의 재결합 확률이 감소하게 되고 셀의 변환효율 증가가 가능하다는 점에 착안하여 제안되었다. 제안된 GaInP/AlGaInP 이중접합 태양전지의 특성을 집광 조건하에서 측정하여 제안된 이중접합 구조가 기존의 pn-GaInP 동중접합을 대신하여 다중 접합 구조 태양전지에서 sub cell로 응용될 가능성에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험

Figure 1은 이 연구에 사용된 에피(epitaxial) 구조를 나타낸다. 이 구조는 n-GaAs 기판 위에 한국 나노 기술원에서 유기금속화학증착(metal organic chemical vapor phase deposition, MOCVD) 장비를 이용하여 성장하였다. 에피구조는 GaAs 기판 위에 200 nm n-GaAs n ohmic contact층, 30 nm N-InAlP 후면전계(back surface field, BSF)층, 800 nm N-AlGaInP ( $E_g = 2.2$  eV) 베이스층, 600 nm p-GaInP ( $E_g = 1.85$  eV) 에미터(emitter)층, p-InAlP 윈도우층( $E_g = 2.36$  eV)과 맨 위에는 옴 접합(ohmic contact)을 위한 200 nm p-GaAs층으로 이루어져 있다. 각 에피층은 GaAs에 격자정합(lattice match) 구조로 설계되었다. (100)표면이 <111>A 방향으로 2° off 된 웨이퍼와 10° off 된 서로 다른 off cut 방향을 갖는 두 종류의 GaAs 기판이 사용되었고 두 종류의 기판 위에 성장된 태양전지의 동작 특성을 비교하였다.

태양전지의 제작은 후면 n 전극 금속의 증착을 위해 전면을 photo-resist로 코팅하여 보호하고 n-전극인 AuGe/Ni/Au (80 nm/80 nm/400 nm)를 GaAs 기판의 후면에 증착하였다. 전면의 p-전극은 포토레지스트(photoresist)를 코팅한 후 노광장비를 사용하여 그리드 패턴을 형성하고 e-beam 증착기를 이용하여 Ti/Pt/Au를 증착한 후 리프트 오프(lift-off) 공정으로 생성하였다. 열처리(annealing) 과정을 통해 옴(ohmic)

$p^{++}$ -GaAs	200nm	( $5 \times 10^{18}$ cm <sup>-3</sup> )
$p$ -In <sub>0.5</sub> Al <sub>0.5</sub> P	50nm	( $8 \times 10^{17}$ cm <sup>-3</sup> )
$p$ -In <sub>0.51</sub> Ga <sub>0.49</sub> P	600nm	( $5 \times 10^{18}$ cm <sup>-3</sup> )
$N$ -In <sub>0.5</sub> (Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> ) <sub>0.5</sub> P	0.8μm	( $5 \times 10^{17}$ cm <sup>-3</sup> )
$n$ -In <sub>0.5</sub> Al <sub>0.5</sub> P	30nm	( $2 \times 10^{18}$ cm <sup>-3</sup> )
$n$ -GaAs	200nm	( $5 \times 10^{18}$ cm <sup>-3</sup> )
$n$ -GaAs substrate		

Figure 1. Schematic epitaxial layer structure of p-GaInP/N-AlGaInP heterojunction structure.

전극을 형성하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Figure 2는 AM 1.5G (air mass 1.5 global, 1 sun 조건)에서 태양전지의 전류 밀도와 전압특성을 나타낸다. 이 연구에서 태양전지는 반사방지막(antireflection coating, ARC)이 증착되지 않은 상태에서 측정되었다. Figure 2 (a)는 2 × 2 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지의 측정결과로 태양전지 전면 전극은 폭 20 μm, 간격 374 μm인 라인이 가로와 세로로 교차하는 격자형이다. 태양전지 금속 전극에 의해 입사광을 가리게 되는데(shadowing effect) 이 태양전지는 전체 2 × 2 mm<sup>2</sup> 면적의 20%에 해당된다. 단락전류밀도(short-circuit current density,  $J_{sc}$ )는 10° off 된 기판 위에 성장한 태양전지에서는 9.21 mA/cm<sup>2</sup>, 2° off 된 기판 위에 성장한 태양전지에서는 6.81 mA/cm<sup>2</sup>이 측정되었다. 개방전압(open-circuit voltage,  $V_{oc}$ )은 10° off 기판 위의 셀은 1.38 V, 2° off 된 기판 위의 셀은 1.37 V가 측정되었다. Figure 2 (b)는 5 × 5 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지의 경우에는 10° off 기판 위의 태양전지에서는  $J_{sc} = 6.54$  mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc} = 1.38$  V가 각각 측정되었고 2° off 기판 위의 태양전지에서는  $J_{sc} = 4.84$  mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc} = 0.98$  V가 각각 측정되었다. 이 태양전지들의 전면 전극은 폭 50 μm, 간격 920 μm인 라인이 가로와 세로로 교차하는 격자형으로 15%의 셀 면적이 금속전극에 의해 가려진다. 두 경우 모두 10° off 기판 위의 태양전지에서  $J_{sc}$ 가 35% 증가한 결과를 얻었다. GaAs substrate의 off 방향에 따라 에피성장 과정 중 n-GaAs 접합(contact)층과 GaAs buffer layer 사이에 산소원자의 흡착정도가 달라지는데 산소 불순물은 비복사 재결합(nonradiative recombination)의 중심이 되는 것으로 알려져 있다[14]. 이 연구에서 사용된 2° off 기판에 성장된 에피층은 10° off 기판에 성장된 에피층보다 20배 높은 산소 불순물(impurity) 농도 차이가 측정되었고 이 불순물 농도차이가  $J_{sc}$ 의 큰 차이를 만들어 낸 것으로 분석되었다[15]. 2° off 기판 위에 제작된 태양전지의 경우 태양전지의 병렬저항(shunt resistance,  $R_{sh}$ )이 낮아서 전류밀도-전압 특성곡선에서 전압이 증가함에 따라 전류가 급

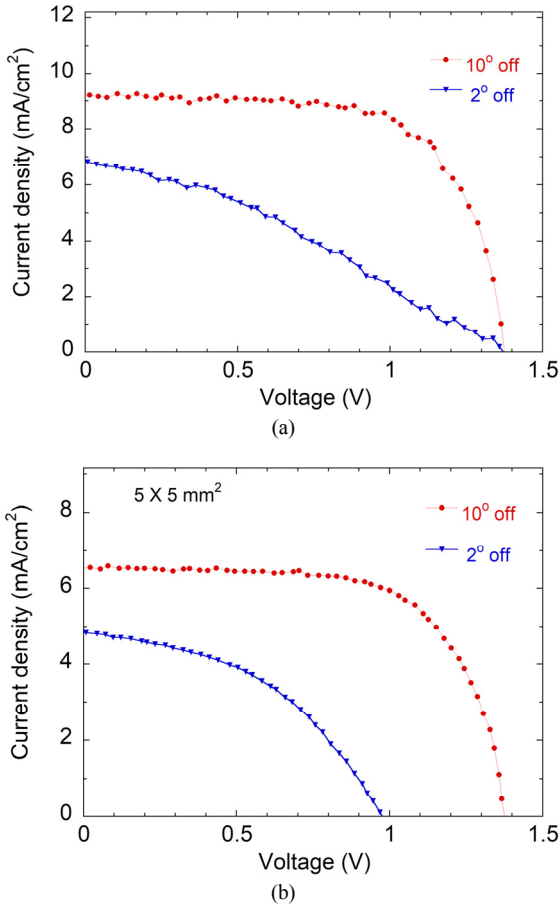


Figure 2. Comparison of current density-voltage (*J-V*) characteristics between PV cells on 2° off and 10° off GaAs substrates under a 1-sun illumination condition without ARC (a) 2 × 2 mm<sup>2</sup> area, (b) 5 × 5 mm<sup>2</sup>.

격히 감소하는 특성을 나타냈고 이는 누설전류(leakage current)가 크기 때문이다. 그 결과 10° off 기판 위에 제작된 태양전지보다 낮은 변환효율(conversion efficiency)을 나타냈다. 변환효율은 2 × 2 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지의 경우 10° off GaAs 기판에서 8.6%, 2° off GaAs 기판에서 3.0%를 얻었고 5 × 5 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지에서는 10° off GaAs 기판에서 6.0%, 2° off GaAs 기판에서 2.1%를 각각 얻었다. 여기서 측정된 태양전지들은 반사막 없이 측정되었는데 윈도우 층으로 사용된 AlInP의 경우 파장 600 nm 근방에서 굴절률이 3.3 정도로 약 27%의 빛을 표면에서 반사한다는 사실도 단락전류와 효율과 관련해서 고려되어야 한다[16].

Figure 3은 10° off 기판 위에 제작된 5 × 5 mm<sup>2</sup> 태양전지의 집광도에 따른 단락전류밀도-전압특성 곡선이다. 높은 집광도에서의 측정을 위해서는 집광에 의해 발생하는 열이 셀에서 잘 외부로 전달되어야 하기 때문에 보통 태양전지의 후면에 수 μm 두께의 금속을 전기도금(electroplating)하는 공정이 필요한데 이 연구에서 측정된 셀들은 전기도금 공정을 하지 않았기 때문에 1 sun에서 20 sun까지의 집광 조건까지 측정하였다. 집광도가 증가함에 따라 단락전류밀도  $J_{sc}$ 는 1 sun에서 6.5 mA/cm<sup>2</sup>, 2 sun에서 13 mA/cm<sup>2</sup>, 4 sun에서 27 mA/cm<sup>2</sup>, 6 sun에서 40 mA/cm<sup>2</sup>, 8 sun에서 53 mA/cm<sup>2</sup>, 10 sun에서 66 mA/cm<sup>2</sup>, 20 sun에서 132 mA/cm<sup>2</sup>로 집광도에 따라 선형적으로 증가했다. 20 sun

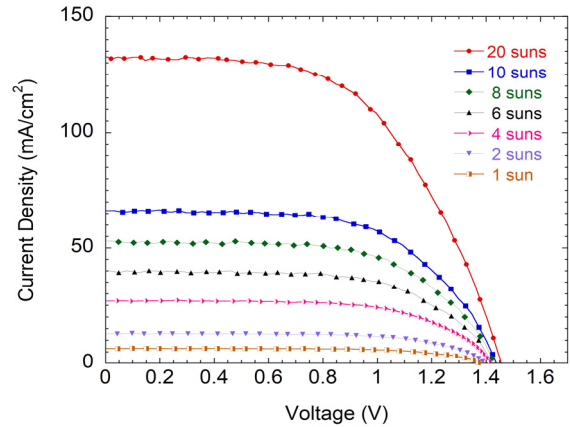


Figure 3. Current density-voltage (*J-V*) characteristics under concentrated illumination.

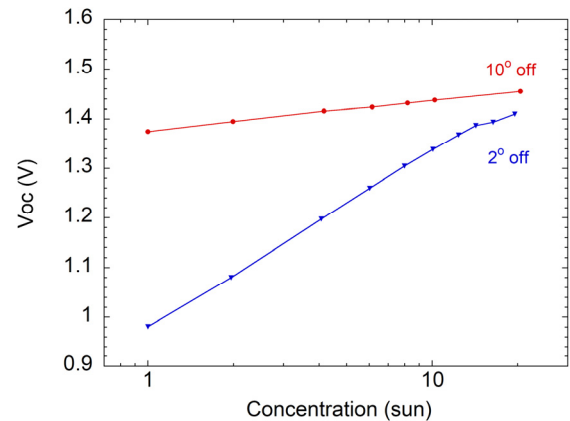
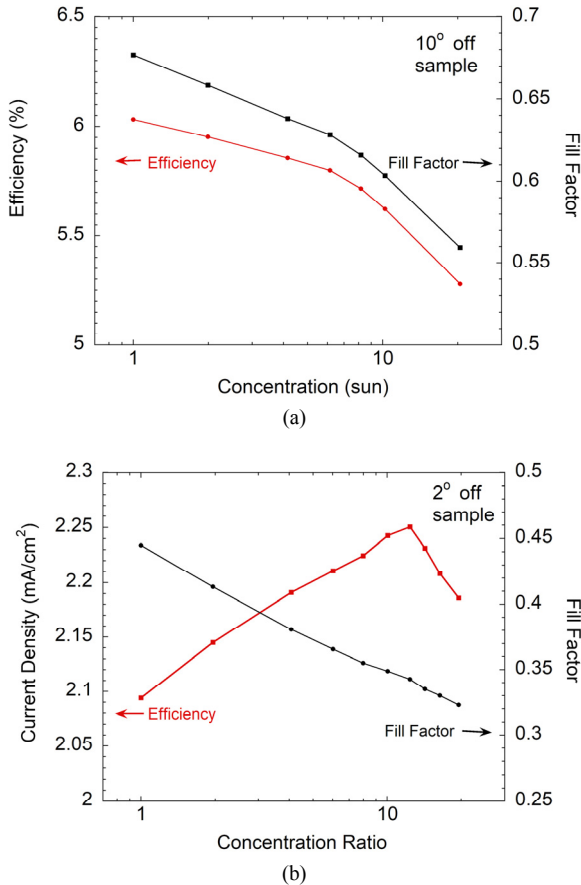


Figure 4. Open-circuit voltage variation in 5 × 5 mm<sup>2</sup> solar cells on 2° off and 10° off GaAs substrates under concentrated illumination.

까지는 열에 의한 저항증가로 인한 전류감소 효과는 나타나지 않았다. Figure 4는 5 × 5 mm<sup>2</sup> 태양전지에서 집광도에 따른 개방전압  $V_{oc}$ 의 변화를 나타낸다. 10° off 기판의 태양전지에서의 개방전압은 입사하는 태양광의 증가에 따라 크게 변하지는 않았는데 개방전압은 1 sun 조건에서 1.38 V로부터 20 sun 조건에서의 1.46 V까지 0.08 V 증가했다. 반면 2° off 기판의 태양전지에서는 1 sun 조건에서 0.98 V로부터 20 sun 조건에서의 1.41 V까지 0.43 V로 상대적으로 크게 변했다. 이는 병렬저항의 값이 낮으면 누설전류가 커져 빛의 세기가 낮은 경우 더 큰 영향을 미치는데 입사광의 증가에 따라 단락전류가 선형적으로 증가한 효과가 전류-전압 특성곡선의 이동에 의한 결과이다.

변환효율(conversion efficiency)과 곡선인자(fill factor)는 Figure 5에 표현되어 있다. Figure 5 (a)에 나타난 10° off GaAs 기판 위에 제작된 태양전지의 경우 1 sun 조건에서 변환효율은 6.03%였고 집광도가 증가함에 따라 감소하여 20 sun 조건에서 5.28%의 값이 얻어졌다. 전류밀도-전압특성곡선(Figure 3)에서 단락전류밀도는 집광도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고 개방전압(Figure 4)도 집광도에 따라 약간 증가하기는 하였으나 최적 동작전류와 최적 동작전압이 집광도가 증가함에 따라 감소하였기 때문에 곡선인자가 0.68에서 0.56로 감소하면서 전체 변환효율이 감소하게 되는 결과로 나타났다. 전류밀도-전압 특성곡선(Figure 3)으로부터 얻은 1 sun 조건에서의 태양전지의



**Figure 5. Conversion efficiency and fill factor variation under concentrated illumination in 5 × 5 mm<sup>2</sup> solar cells (a) on 10° off GaAs substrates, (b) on 2° off GaAs substrates.**

직렬저항(series resistance,  $R_s$ ) 값이 70 Ω의 값을 나타냈는데 변화곡선인자가 감소된 원인으로는 이처럼 상대적으로 큰  $R_s$ 가 원인으로 추정된다. 직렬저항은 p와 n 접촉(contact)저항에 의해 영향을 받는데 접촉저항의 감소를 위해서는 GaAs contact층의 도핑농도의 최적화가 필요할 것으로 보인다. Figure 5 (b)에 나타난 2° off GaAs 기판 위에 제작된 태양전지의 경우는 집광도가 증가함에 따라 1 sun에서 12 sun까지는 2.1%에서 2.3%까지 증가하였으나 그 이후부터 감소하여 20 sun 조건에서 2.2%의 값을 얻었다. 2° off 샘플의 경우 변환효율의 증가는 개방전압  $V_{oc}$ 의 큰 변화에 의해 발생된 것으로 생각된다.

이 연구에서는 기존의 pn 동종접합 GaInP를 p-GaInP/N-AlGaInP의 이중접합으로 대체하여 변환효율의 증가 가능성을 살펴보았다. GaAs 기판의 off-cut 각도에 따른 산소 불순물(impurity)의 흡착은 집광 측정 시에도 태양전지의 성능 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 이중접합 태양전지의 에피층 최적화가 이루어지지 않아서 효율이 증가되는 결과를 얻지는 못하였지만 p-GaInP와 N-AlGaInP 층에서의 두께와 도핑농도에 대한 최적화를 통하면 변환효율이 증가의 가능성은 충분함을 알 수 있었다. 대부분의 태양광의 흡수가 일어나는 p-GaInP층의 두께가 600 nm로 상대적으로 얇은 층이 사용되었는데 이 에피층의 두께를 증가시키면 단락전류의 개선이 가능하고 800 nm 두께의 N-AlGaInP층을 얇게 하여 태양광에 의해 생성된 광전자가 이동하는 동안 재결합 확률을 줄인다면 전하의 수집확률을 높여 변환효율이 증가될 것으로 생각된다. 제안된 GaInP/AlGaInP 이중접합

구조의 최적화를 통해 변환확률의 증가가 얻어진다면 이를 다중접합 구조 태양전지의 맨 위의 서브 셀(top subcell)에 적용시킬 수 있을 것으로 생각된다.

### 4. 결 론

p-GaInP/N-AlGaInP의 이중접합 에피 구조를 제안하고 이 구조가 기존의 pn-GaInP의 동종접합을 대체하여 변환효율을 증가시킬 수 있을지에 대하여 집광 조건 하에서의 작동 특성에 대하여 조사하였다. 1 sun 조건하에서 10° off 된 기판 위에 제작된 2 × 2 mm<sup>2</sup> 면적의 태양전지에서 9.21 mA/cm<sup>2</sup>의 단락전류밀도와 1.38 V의 개방전압, 8.2%의 변환효율이 얻어졌다. 집광 조건 하에서 10° off 기판 위에 제작된 5 × 5 mm<sup>2</sup> 태양전지의 전류-전압특성 곡선에서 단락전류는 1 sun의 6.5 mA/cm<sup>2</sup>로부터 20 sun에서 132 mA/cm<sup>2</sup>로 집광도에 따라 선형증가 하였으나 상대적으로 큰 직렬저항 값으로 인해 곡선인자가 감소하여 변환효율은 6.03% (1 sun)에서 5.28% (20 sun)로 감소하였다. 2° off 된 기판 위에 제작된 태양전지는 높은 병렬저항으로 인해 10° off 기판 위에 제작된 태양전지에 비해 낮은 단락 전류와 변환효율을 나타냈다.

### 감 사

이 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단·나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0082580).

### References

1. M. Liu, G. S. Kinsey, W. Bagiński, A. Nayak, and V. Garboushian, Indoor and outdoor comparison of CPV III-V multijunction solar cells, *IEEE J. Photovolt.*, **3**(2), 888-892 (2013).
2. D. Sato, K.-H. Lee, K. Araki, M. Yamaguchi, and N. Yamada, Design and evaluation of a III-V/Si partial CPV module for maximization of power generation per unit module area, *IEEE J. Photovolt.*, **9**(1), 147-153 (2019).
3. M. Wiesenfarth, I. Anton, and A. W. Bett, Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies, *Appl. Phys. Rev.*, **5**(4), 041601 (2018).
4. Y. Jeong, D.-W. Park, J. K. Lee, and J. Lee, III-V tandem, CuInGa(S,Se)<sub>2</sub>, and Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> compound semiconductor thin film solar cells, *App. Chem. Eng.*, **26**(5), 526-532 (2015).
5. M. Steiner, G. Siefer, T. Schmidt, M. Wiesenfarth, F. Dimroth, and A. W. Bett, 43% sunlight to electricity conversion efficiency using CPV, *IEEE J. Photovolt.*, **6**(4), 1020-1024 (2016).
6. R. M. France, J. F. Geisz, I. Garcia, M. A. Steiner, W. E. McMahon, D. J. Friedman, T. E. Moriarty, C. Osterwald, J. Scott Ward, A. Duda, M. Young, and W. J. Olavarria, Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices, *IEEE J. Photovolt.*, **5**(1), 432-437 (2015).
7. R. M. France, I. Garcia, W. E. McMahon, A. G. Norman, J. Simon, J. F. Geisz, D. J. Friedman, and M. J. Romero, Lattice-mismatched 0.7-eV GaInAs solar cells grown on GaAs using GaInP compositionally graded buffers, *IEEE J. Photovolt.*, **4**(1), 190-195 (2014).
8. R. M. France, J. F. Geisz, M. A. Steiner, B. To, M. J. Romero, W. J. Olavarria, and R. R. King, Reduction of crosshatch roughness and threading dislocation density in metamorphic GaInP buf-

- fers and GaInAs solar cells, *J. Appl. Phys.*, **111**(10), 103528 (2012).
9. F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T. N. D. Tibbits, E. Oliva, G. Siefer, M. Schachtner, A. Wekkeli, A. W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel, and K. Schwarzburg, Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency, *Prog. Photovolt.*, **22**(3), 277-282 (2014).
  10. P. T. Chiu, D. C. Law, R. L. Woo, S. B. Singer, D. Bhusari, W. D. Hong, A. Zakaria, J. Boisvert, S. Mesropian, R. R. King, and N. H. Karam, Direct semiconductor bonded 5J cell for space and terrestrial applications, *IEEE J. Photovolt.*, **4**(1), 493-497 (2014).
  11. S. Song, H. I. Choi, I. S. Shin, S. S. Park, G. D. Lee, S. H. Park, and Y. Jin, Synthesis and photovoltaic properties of copolymers with fluorinated quinoxaline and fluorene moiety, *Appl. Chem. Eng.*, **27**(5), 467-471 (2016).
  12. J. F. Geisz, M. A. Steiner, I. Garcia, S. R. Kurtz, and D. J. Friedman, Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells, *Appl. Phys. Lett.*, **103**(4), 041118 (2013).
  13. L. S. Kyu, Electrochemical characterization of fluorine doped TiO<sub>2</sub> dye-sensitized solar cells, *Appl. Chem. Eng.*, **22**(5), 461-466 (2011).
  14. N. Chand, A. S. Jordan, S. N. G. Chu, and M. Geva, Residual oxygen levels in AlGaAs/GaAs quantum well laser structures: Effects of Si and Be doping and substrate misorientation, *Appl. Phys. Lett.*, **59**(25), 3270-3272 (1991).
  15. J. Kim and H.-B. Shin, Effect of substrate off-orientation on the characteristics of GaInP/AlGaInP single heterojunction solar cells, *Korean J. Chem. Eng.*, **36**(2), 305-311 (2019).
  16. D. J. Aiken, High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **64**(4), 393-404 (2000).