

방열 특성에 따른 집광형 태양전지의 광전변환효율 변화에 관한 실험적 연구

김강호^{1,2)} · 정상현^{1,2)} · 김영조^{1,2)} · 김창주¹⁾ · 전동환¹⁾ · 신현범¹⁾ · 이재진^{2)*} · 강호관^{1)*}

¹⁾한국나노기술원, 수원시, 443-270,

²⁾전자공학과, 아주대학교, 수원시, 443-749

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of the Conversion Efficiency in the Concentrated Photovoltaic Cells

Kangho Kim^{1,2)} · Sang Hyun Jung^{1,2)} · Youngjo Kim^{1,2)} · Chang Zoo Kim¹⁾ · Dong Hwan Jun¹⁾ · Hyun-Beom Shin¹⁾ · Jaejin Lee^{2)*} · Ho Kwan Kang^{1)*}

¹⁾Korea Advanced Nano Fab Center, Suwon, 443-270, Korea

²⁾Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, 443-749, Korea

ABSTRACT: Under concentrated illuminations, the solar cells show higher efficiencies mainly due to an increase of the open circuit voltage. In this study, InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells have been grown by a low pressure metalorganic chemical vapor deposition. Photovoltaic characteristics of the fabricated solar cells are investigated with a class A solar simulator under concentrated illuminations from 1 to 100 suns. Ideally, the open circuit voltage should increase with the current level when maintained at the same temperature. However, the fabricated solar cells show degraded open circuit voltages under high concentrations around 100 suns. This means that the heat sink design is not optimized to keep the cell temperature at 25°C. To demonstrate the thermal degradation, changes of the device performance are investigated with different bonding conditions and heat sink materials.

Key words: Heat transfer, Conversion efficiency, Concentrated photovoltaics, Solar cells, Open circuit voltage

Nomenclature

V_{oc} : open circuit voltage, V
 J_{sc} : short-circuit current, mA/cm²
 J_0 : dark saturation current, mA/cm²
 FF : fill factor
 P_{in} : input power, W
 η : conversion efficiency, %
 T : temperature, K
 n : diode factor
 k : Boltzmann constant, J/K-molecule
 q : magnitude of electron charge, C
 γ : minority carrier lifetimes, s
 R_s : series resistance, Ω
 R_{sh} : shunt resistance, Ω

Subscript

MOCVD : metal organic chemical vapor deposition
 CPV : concentrated photovoltaic
 PCB : printed circuit board
 PMSS : pulse mode solar simulator
 FMSS : flash mode solar simulator
 CIGS : copper indium gallium selenide
 BSF : back surface field
 RTA : rapid thermal annealing
 TMGa : trimethylgallium
 TMin : trimethylindium
 DEZn : diethylzinc
 DETe : diethyltellurium
 AsH₃ : arsine
 PH₃ : phosphine
 CBr₄ : carbon tetrabromide
 SiH₄ : silane
 UHP H₂ : ultra-high purity hydrogen

*Corresponding author: hokwan.kang@kanc.re.kr, jaejin@ajou.ac.kr

Received August 29, 2014; Revised September 4, 2014;

Accepted September 4, 2014

© 2014 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

최근 화석연료의 고갈과 환경오염 문제로 인해 산재생에너지 개발의 필요성이 높아지고 있다. 특히 친환경적이고, 무한재생이 가능한 태양에너지가 그 첫 번째 후보로 주목받고 있다¹⁾. 태양전지는 태양광 에너지를 전기에너지로 변환하는 소자이며, 태양전지의 광전변환효율이 향상할수록 에너지 생산원가를 낮출 수 있어 태양전지 효율 향상 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 현재 실리콘 기반 태양전지, CIGS, dye/quantum dot-sensitive, 그리고 III-V 화합물 반도체 기반 태양전지 등 다양한 종류의 태양전지가 연구 되고 있으며²⁾ 태양전지의 세계 최고효율은 297 sun에서 44.7% (AM1.5D, pulse mode solar simulator)로 미국의 Soitec (Fraunhofer Ins.)사의 InGaP/GaAs/InGaAsP/InGaAs 사중접합 태양전지이다³⁾. 이처럼 고효율을 얻기 위해서는 집광 시스템의 이용은 필수적이다. 실리콘 태양전지는 적층형 구조의 태양전지 구현이 어렵고 간접천이 특성을 지닌 반도체이므로 온도 변화에 상당히 민감하여 20배 미만의 중저집광용 태양전지로 연구되고 있다⁴⁾. 반면, III-V 화합물 반도체 태양전지는 제조비용이 다른 태양전지들에 비해 높지만, 태양광 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있는 적층형 구조 및 직접천이의 특성을 가지고 있어 고집광이 가능하며 집광시 고효율을 구현이 가능하여 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 많은 연구가 진행 중이다.

일반적으로 CPV 소자의 집광 측정은 실험적 효율을 얻기 위해 펄스 광원을 사용하여 집광 측정시 온도변화가 없는 PMSS로 측정하고 있다⁵⁾. 하지만 실제 태양광 발전에서는 빛이 연속적으로 조사되어 집광시 CPV 소자에 높은 열이 발생하게 되고 집광비가 커질수록 소자내부 온도가 상승하여 광전변환효율이 감소하게 된다⁶⁾. 따라서 옥외에서도 CPV 소자의 높은 효율을 얻기 위해 에피구조 설계와 공정 설계 외에도 효과적인 방열에 대한 이해와 설계가 매우 중요하다.

본 연구에서는 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지인 InGaP/InGaAs/Ge 삼중접합 태양전지를 제작하고, 집광비에 따라 온도변화가 있는 FMSS를 이용하여 방열 조건에 의한 광전변환효율 특성 변화를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 CPV 소자와 PCB의 접촉 면적에 따른 광전변환효율

CPV 소자를 PCB에 붙일 때 사용하는 silver paste (P-100, $\leq 10^{-4} \Omega \cdot m$)의 양을 조절하여 Table 1과 Fig. 1의 모식도와 같이 접촉 면적에 따른 CPV 소자의 광전변환효율 변화를 분석하였다. CPV 소자는 에피구조 문제 및 공정 문제를 배제하기 위해 집광

Table 1. silver paste 양에 따른 접촉면적

Sample	Volume (μl)	Area (mm^2)
S	1	3.14
M	2	12.56
L	3	28.26

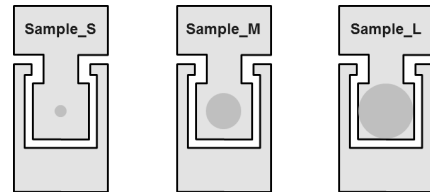


Fig. 1. Samples S, M, L의 PCB 모식도

Ohmic
Window
InGaP Top cell
BSF
Tunnel junction
Window
InGaAs Middle cell
BSF
Tunnel junction
Window
Ge Bottom cell
p-Ge (100) substrate 6°-off toward [111]

Fig. 2. InGaP/InGaAs/Ge 삼중접합 태양전지 구조

시 광전변환효율이 38%인 상용 CPV 소자를 사용하였고, PCB는 Al 기반 PCB를 사용하였다.

집광비에 따른 효율 변화를 분석하기 위해 집광 측정이 가능한 FMSS (WXS-220S-L2, class A)를 이용하여 AM 1.5G 조건에서 측정하였다.

집광 측정은 100배 까지 집광 가능한 프레넬 렌즈(Fresnel lens)를 사용하여 초점 거리를 조절하는 방법으로 1~100 suns 까지 측정하였다.

2.2 PCB 물질에 따른 광전변환효율

MOCVD (AIX 2600) 장비를 사용하여 Fig. 2와 같은 InGaP/InGaAs/Ge 삼중접합 태양전지를 성장하였다. III족 원소의 precursor로는 TMGa과 TMIIn을, V족 원소로는 AsH₃와 PH₃ 가스를 사용하였다. P-type과 n-type 불순물은 각각 DEZn과 CBr₄, SiH₄와 DETe를 사용하고, 운송가스로는 UHP H₂를 사용하였다. 반응로의 압력은 50 mbar로 고정하였으며, 성장온도는 각 층의 물질 특성에 따라 600~700°C로 변화시켰다. P-type Ge (100) 기판에 phosphorus를 주입시키는 원자확산법으로 Ge bottom cell을 구현한 후, window 및 BSF 층을 포함한 InGaAs middle cell, InGaP top cell을 순차적으로 성장하였다. 각각의

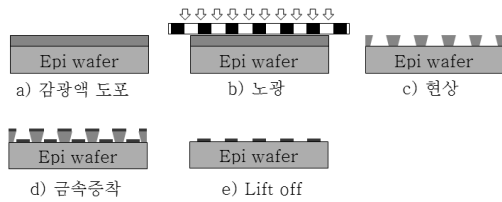


Fig. 3. Metal 전극 형성 공정 흐름도

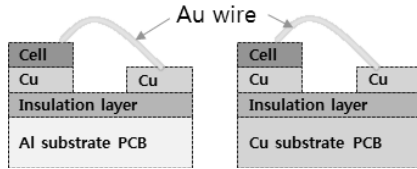


Fig. 4. Al 기반(좌) 및 Cu 기반(우) PCB의 모식도

subcell은 tunnel 접합 구조를 통하여 전기적으로 연결된다.

MOCVD 기술로 성장된 태양전지 에피웨이퍼에 금속 전극을 형성하기 위해 Acetone - IPA - DI 순의 유기 세정을 한 후 Fig. 3과 같이 사진현상공정을 이용하여 metal grid 패턴을 형성하고 e-beam evaporator로 금속을 증착하였다. 전면전극과 후면전극은 각각 AuGe/Ni/Au와 Ti/Pt/Au 구조를 사용하였고⁷⁾, 금속과 반도체간의 ohmic contact 형성을 위해 RTA 장비로 열처리 과정을 진행하였다. 광흡수 손실을 방지하기 위하여 aperture area의 GaAs ohmic 층은 NH₄OH:H₂O₂:DI (2:1:10) 용액을 이용한 습식식각 방법으로 제거하였다⁸⁾. 제작된 태양전지 에피웨이퍼는 mesa isolation 공정과 dicing 공정을 통하여 각각의 단위 셀로 분리된다. 제작된 태양전지 셀의 크기는 6.5 mm × 5.5 mm이며, 빛을 흡수할 수 있는 aperture area는 5.5 mm × 5.5 mm로 설계되었다.

제작된 CPV 소자를 silver paste를 사용하여 Al 기반 metal PCB에 부착하였으며, 전면전극은 wire bonding 공정을 통하여 gold wire로 연결하였다.

CPV 소자의 PCB는 태양전지의 양극을 분리해주는 전기적인 기능 외에도 절연체 밑으로 금속을 부착하여 집광시 발생한 소자 내부의 열을 흡수 및 방출하는 방열판의 기능도 수행한다. 이를 실험적으로 확인하기 위해 제작한 CPV 소자를 Fig. 4와 같이 열전도도가 상대적으로 낮은 Al 기반 PCB와 열전도도가 상대적으로 높은 Cu 기반 PCB에 각각 분당하여 CPV 소자의 광전 변환효율 변화를 비교 분석하였다.

집광측정은 실험 방법 2.1의 측정방법과 동일 조건으로 1~100 suns 까지 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CPV 소자와 PCB의 접촉 면적에 따른 광전변환효율

CPV 소자의 광전변환효율(η)은 식 (1)에서와 같이 V_{oc}, FF,

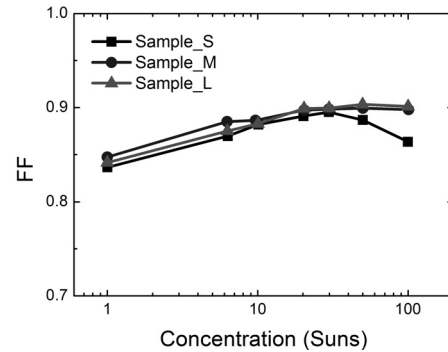


Fig. 5. 접촉 면적에 따른 FF의 변화

J_{sc}의 변화에 기인한다. 집광시 J_{sc}는 집광비에 비례하여 증가하지만 J_{sc}의 증가는 P_{in}의 증가와 상쇄되어 CPV 소자의 광전 변환효율은 FF와 V_{oc}의 변화에 의해 결정된다.

$$\eta = \frac{V_{oc}^{Xsuns} \times (J_{sc} \times X) \times FF^{Xsuns}}{(P_{in} \times X)} [\%] \quad (1)$$

Fig. 5는 집광시 CPV 소자와 PCB의 접촉 면적에 따른 FF 변화를 나타낸 그래프이다. Sample M과 L의 FF는 저집광 영역에서는 증가하고 고집광 영역에서는 포화하는 것을 확인하였다. 반면 sample S의 FF는 50 suns에서 감소하여 다른 sample들과는 다른 양상을 보였다. 소자특성이 양호한 CPV 소자의 FF는 집광비가 커질수록 소자의 R_s가 감소하여 집광비가 커질수록 증가하다가 R_s의 감소 한계에 의해 더 이상 증가하지 못하고 포화되거나 감소한다⁶⁾. FF 또한 온도함수로 결정되는 변수이기 때문에^{6,7)} 좁은 접촉면적으로 인하여 PCB로 효과적으로 열을 전달하지 못한 sample S는 R_s의 감소에 의한 FF의 증가량 보다 온도에 의한 FF의 감소량이 더 커 낮은 집광비에서 FF가 감소하기 시작한 것으로 보인다.

집광시 FF의 변화는 저집광 영역에서의 증가폭이 상대적으로 커서 CPV 소자의 광전변환효율 증가에 직접적인 영향을 주지만 고집광 영역에서는 포화되거나 감소하여 미미한 영향을 주거나 오히려 저하시키는 요인이 된다⁹⁾. 따라서 CPV 소자의 광전변환효율 증가는 V_{oc}의 증가와 매우 밀접한 관계가 있다고 말할 수 있다.

집광시 V_{oc}는 J_{sc}의 증가로 아래 식 (2)에 의해 온도 변화가 없다는 가정 하에 V_{oc}를 자연로그 함수로 증가 시킨다⁷⁾.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right) [V] \quad (2)$$

하지만 식 (3)과 같이 온도 함수로 결정되는 V_{oc}는 집광비가 커지면 온도 상승에 반비례 관계로 감소하게 되고 결국 CPV 소

자의 광전변환효율을 저하 시킨다⁶⁾.

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = -\frac{1}{T} \left(\frac{nE_g}{q} - V_{oc} + \frac{nkT}{q} \left(3 + \frac{\gamma}{2} \right) \right) + \frac{nkT}{q} \frac{1}{J_{sc}} \frac{\partial J_{sc}}{\partial T} + \frac{n}{q} \frac{\partial E_g}{\partial T} \quad (3)$$

Fig. 6은 집광시 접촉 면적에 따른 V_{oc} 의 변화를 나타낸 그래프이다. 식 (2)에 의한 simulation 결과와는 달리 집광비가 커지면서 V_{oc} 의 증가율이 작아지는 것을 확인하였다. 특히 높은 열이 발생하는 고집광 영역의 V_{oc} 증가율 감소가 큰 것을 확인하였고 접촉 면적이 넓을수록 V_{oc} 의 증가율이 우수한 것을 확인하였다. 넓은 접촉 면적이 집광열을 PCB로 효율적으로 전달하여 V_{oc} 의 열에 의한 영향이 감소하였음을 의미한다. 반대로 접촉 면적이 좁을수록 집광에 의한 열이 소자 외부로 빠져나가지 못해 열에 의한 영향이 매우 크게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 집광시 접촉 면적에 따른 광전변환효율 변화를 나타낸 그래프이다. 광전변환효율의 변화 추이는 Fig. 6의 V_{oc} 변화 추이와 매우 유사한 것을 확인 할 수 있다. 집광시 CPV 소자의 광전변환 효율을 결정짓는 주요 요인인 V_{oc} , J_{sc} , FF 중 V_{oc} 의 변화가 가장 중요한 요인임을 실험을 통해 확인하였다. 또한 CPV 소자와 PCB의 접촉 면적이 넓을수록 우수한 방열 특성으로 V_{oc} 의 증가율이 향상되고 그에 따라 CPV 소자의 광전변환효율도

향상되는 것을 확인하였다.

3.2 PCB 물질에 따른 광전변환효율

Table 2은 금속들의 열전도도를 정리한 표이다. Cu는 Al보다 상대적으로 높은 열전도도 특성을 가져 방열에 우수한 물질임을 알 수 있다.

제작한 CPV 소자를 Al과 Cu 기반 PCB에 각각 본딩하여 집광측정한 결과를 Table 3과 Table 4에 정리하였다. PCB 본딩은 선행연구인 CPV 소자와 PCB의 접촉 면적에 따른 광전변환효율 변화 분석 결과를 적용하였다.

Fig. 8은 Al과 Cu 기반 PCB의 방열 특성에 따른 V_{oc} 의 변화를 Table 3과 Table 4에서 추출하여 비교 분석한 그래프이다. Al보다 Cu 기반 PCB를 사용했을 때 V_{oc} 증가율이 더 우수한 것을 확인하였다. 열전도도가 상대적으로 높은 Cu 기반 PCB는 우수한 방열특성으로 집광열을 PCB로 효율적으로 전달하여 V_{oc} 의 증가율을 향상시켰다. V_{oc} 의 증가는 CPV 소자의 광전변환 효율 변화에 그대로 반영되어 Fig. 9에서와 같이 Cu 기반 PCB를 사용했을 때 CPV 소자의 광전변환효율 증가율이 더 우수한 것을 확인하였다. FF 변화는 Fig. 9에서와 같이 저집광 영역에서는 증가

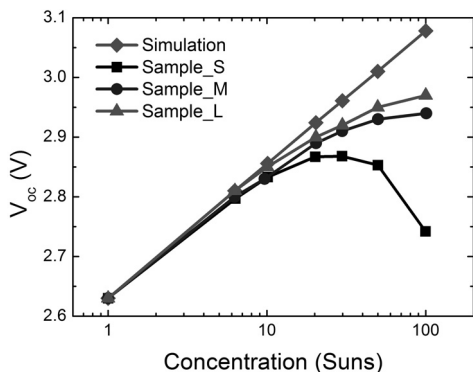


Fig. 6. 접촉 면적에 따른 V_{oc} 의 변화

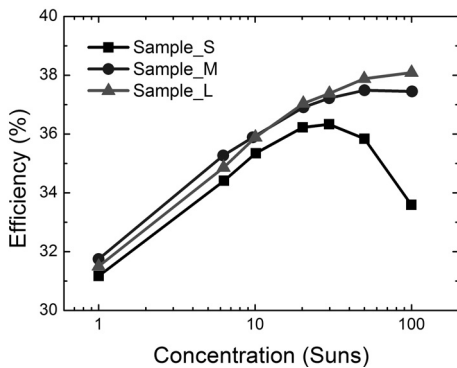


Fig. 7. 접촉 면적에 따른 효율의 변화

Table 2. 금속의 열전도도 특성

Materials	Thermal conductivity (W/m · K)
Ag	429.0
Cu	401.0
Au	318.0
Al	237.0

Table 3. 집광비에 따른 소자특성 변화 (Al기반 PCB)

Suns	η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF
1.00	28.03	2.521	12.932	0.8595
7.21	30.90	2.694	93.304	0.8872
9.85	31.29	2.718	127.414	0.8901
20.06	32.25	2.771	259.397	0.9001
29.81	32.61	2.796	385.455	0.9020
49.60	32.94	2.822	641.469	0.9025
100.39	33.10	2.843	1298.215	0.9005

Table 4. 집광비에 따른 소자특성 변화 (Cu기반 PCB)

Suns	η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF
1.00	27.96	2.514	12.944	0.8592
6.63	30.87	2.689	85.773	0.8870
10.10	31.41	2.727	130.723	0.8899
21.20	32.45	2.786	274.390	0.8998
29.66	32.81	2.811	383.863	0.9018
50.11	33.24	2.845	648.663	0.9025
104.90	33.69	2.884	1357.871	0.9025

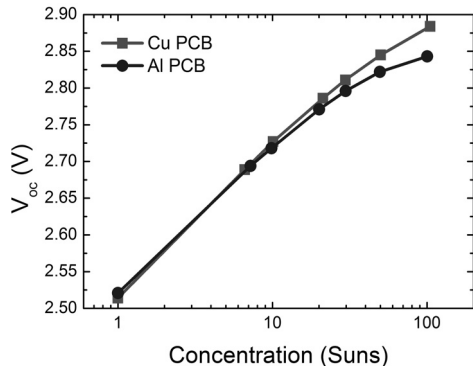


Fig. 8. PCB 물질에 따른 V_{oc} 의 변화

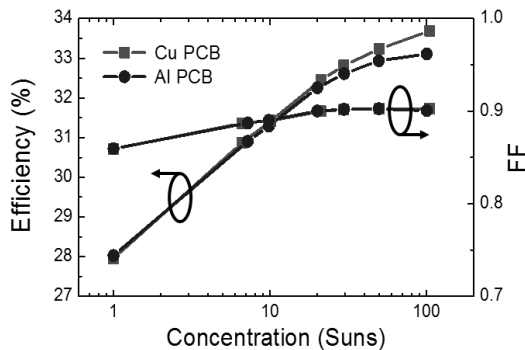


Fig. 9. PCB 물질에 따른 효율 및 FF의 변화

하고 고집광 영역에서는 포화하는 전형적인 변화추이를 나타냈다. 이를 통해 제작한 집광형 InGaP/InGaAs/Ge 삼중접합 태양전지가 상용화 CPV 소자만큼 양호한 CPV 소자인 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고품위 InGaP/InGaAs/Ge 삼중접합 태양전지 구조를 MOCVD 성장기술로 성장하고, 태양전지 공정기술을 통하여 집광형 태양전지를 제작한 후 집광이 가능한 class A solar simulator를 이용하여 집광 측정 및 분석하여 방열 특성이 집광형 태양전지의 소자특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 특히 집광에 의한 높은 열이 V_{oc} 변화에 미치는 영향에 대하여 집중적으로 분석하였다.

상용 CPV 소자와 Al 기반 PCB의 접촉 면적을 조절하여 방열에 따른 태양전지 특성 변화를 분석하였다. 집광에 의한 온도 상승이 V_{oc} 를 감소시켜 집광결과 V_{oc} 의 반비례관계를 실험적으로 확인하였다. 또한 FF 역시 온도변화에 영향을 받는 것을 확인하였다.

제작한 CPV 소자를 Al과 Cu 기반 PCB에 각각 분당하여 CPV 소자의 광전변환효율 변화를 비교 분석하였다. Cu의 상대적으로 높은 열전도도로 인해 Cu 기반 PCB를 사용했을 때의 CPV 소자의 광전변환효율이 개선되는 것을 확인하였다.

결과적으로 CPV 소자의 효율을 결정짓는 주요 요인인 V_{oc} 와 FF는 온도변화에 영향을 받아 CPV 소자를 설계할 때에는 태양 전지 에피구조 설계와 공정 설계 외에도 방열이 효과적으로 이루어질 수 있도록 태양전지의 전극구조 및 PCB의 물질 등 넓은 범위의 방열 메커니즘을 분석하는 연구가 중요함을 확인하였다. 추후 방열 특성 개선 연구가 활발히 진행된다면 CPV 소자의 광전변환 효율은 크게 증가할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2014년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20123010010110).

References

1. B. Li, L. Wang, B. Kang, P. Wang, Y. Qiu, "Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, 549-573, 2006.
2. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 44)," *Progress photovoltaics: Research and Application* 22, 701-710, 2014.
3. 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, K. Schwarzburg, "Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency," *Progress photovoltaics: Research and Application* 22, 277-282, 2014.
4. 신재혁, 이승신, 김상민, 부준홍 "온도에 따른 집광형 태양전지의 성능에 관한 실험적 연구," 한국태양에너지학회 논문집 32, 96-101, 2012.
5. C.R. Osterwald, M.W. Wanlass, T. Moriarty, M.A. Steiner, K.A. Emery, "Effects of Spectral Error in Efficiency Measurements of GaInAs-Based Concentrator Solar Cells," *National Renewable Energy Laboratory Technical Report*, NREL/TP-5200-60748, Golden, CO, 2014.
6. G. S. Kinsey, P. Hebert, K. E. Barbour, D. D. Krut, H. L. Cotal, R. A. Sherif, "Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature," *Progress photovoltaics: Research and Application* 16, 503-508, 2008.
7. H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon, N. Karam, "III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics," *Energy & Environmental Science* 2, 174-192, 2009.
8. A. Duda, S. Ward, M. Young, "Inverted metamorphic multijunction (IMM) cell processing instructions," *National Renewable Energy Laboratory Technical Report*, NREL/TP-5200-54049, Golden, CO, 2012.