

# 탠덤형 태양전지를 위한 InAs 다중 양자점과 InGaAs 다중 양자우물에 관한 연구

조중석<sup>a</sup> · 김상효<sup>a</sup> · 황보수정<sup>b</sup> · 장재호<sup>a</sup> · 최현광<sup>a</sup> · 전민현<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>인제대학교 나노시스템공학과, 나노메뉴팩처링연구소, 김해 621-749

<sup>b</sup>Dyesol-timo DSC 연구소, 성남 462-725

(2009년 6월 10일 받음, 2009년 7월 28일 수정, 2009년 8월 5일 확정)

본 연구에서는 1.1 eV의 에너지대역을 흡수할 수 있는 InAs 양자점구조와 1.3 eV의 에너지 대역을 흡수 할 수 있는 InGaAs 양자우물구조를 이용한 탠덤형 태양전지의 구조를 1D poisson을 이용해 설계하고, 분자선 에피택시 장비를 이용하여 각각 5, 10, 15층씩 쌓은 양자점 및 양자우물구조를 삽입하여 p-n접합을 성장하였다. Photoluminescence (PL) 측정을 이용한 광학적 특성 평가에서 양자점 5층 및 양자우물 10층을 삽입한 구조의 PL 피크가 가장 높은 상대발광강도를 나타냈으며, 각각 1.1 eV 및 1.3 eV에서 57.6 meV 및 12.37 meV의 Full Width at Half Maximum을 나타내었다. 양자점의 밀도 및 크기는 Reflection High-Energy Electron Diffraction system과 Atomic Force Microscope를 이용해 분석하였다. 그리고 GaAs/AlGaAs층을 이용한 터널접합에서는 I-V 측정을 통하여 GaAs층의 두께(20, 30, 50 nm)에 따른 터널링 효과를 평가 하였다. GaAs 층의 두께가 30 nm 및 50 nm의 터널접합에서는 backward diode 특성을 나타낸 반면, 20 nm GaAs층의 GaAs/AlGaAs 터널접합에서는 다이오드 특성 곡선을 확인하였다.

주제어 : Tandem 태양전지, 양자점, 양자우물, 터널접합

## I. 서 론

탠덤형 구조는 터널접합 기술의 개발로 단일접합 태양전지 사이에 금속전극 없이 반도체 박막만으로 직렬연결이 가능하게 되면서부터 관심이 집중되었다 [1]. 다양한 밴드갭 에너지를 가지는 III-V족 화합물 반도체를 이용한 탠덤형 구조의 태양전지는 단일접합 태양전지보다 원하는 각 에너지 대역을 나누어서 흡수하여 높은 변환 효율을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다 [2]. 현재 화합물 반도체를 이용한 태양전지의 최고 효율은 3중접합구조를 이용한 GaInP/InGaAs/Ge 탠덤형 태양전지가 40 %의 변환효율을 기록하고 있으며, 각 이중접합은 1.8 eV, 1.3 eV 및 0.7 eV 영역의 태양광 스펙트럼을 흡수 할 수 있게 설계 되었다 [3]. 일반적으로 접합의 수가 증가 할수록 변환효율은 증가한다고 보고되고 있으며, 현재의 구조에서 보다 높은 변환 효율을 얻기 위해서 GaAs와 Ge접합 사이에 1.0 eV의 영역을 흡수 할 수 있는 구조가 제시 되어져 있다 [4,5]. 즉, 탠덤형 구조의 태양전지에서 이론적으로 최대 59 %의 효율을

얻을 것으로 예상 되어지는 4중접합 이상의 태양전지의 구현을 위해 1.0 eV 대역의 에너지를 흡수할 수 있는 cell이 필요하며 [6], GaAs 및 Ge과 격자 정합되는 InGaAsN물질이 그 후보로 연구되어지고 있다.

그러나 InGaAsN는 4성분계의 물질로 조성의 조절 및 성장이 어렵고 낮은 이동도와 짧은 소수캐리어 수명 때문에 낮은 에너지 변환효율을 가진다는 단점이 있다 [7,8]. 본 연구에서는 분자선 에피택시를 이용하여 1.0 eV 대역의 에너지를 흡수하기 위한 물질로 InAs 양자점을 활성층으로 이용하여 적층주기에 따른 양자점의 크기 및 밀도 조절을 통해 에너지 대역을 조절하는 실험과 1.3 eV 대역의 에너지를 흡수하기 위해 InGaAs 양자우물을 활성층으로 적층 주기를 달리 하는 태양전지 구조를 1D Poisson을 이용하여 설계하고 각각의 구조를 분자선 에피택시 장비로 성장하였다 [9]. 또한 이들 각 태양전지의 접합을 위한 GaAs/AlGaAs 터널구조의 설계 및 평가를 통하여 터널접합 구조를 연구하였다.

\* [전자우편] mjeon@inje.ac.kr

## II. 실험방법

본 실험에서는 적층구조에서 1.1 eV 대역의 에너지를 흡수하기 위해 InAs 다중 양자점구조의 태양전지와 1.3 eV 대역의 에너지를 흡수하기 위해 InGaAs 다중 양자우물구조의 태양전지를 분자선 에피택시를 이용하여 제작하였다. 태양전지의 최적화를 위해 각각 양자점과 양자우물의 적층 주기를 5, 10, 및 15층으로 성장하였고 터널접합은 double hetero 접합일 때 열에 더 강한 특성을 보이므로 [10], GaAs의 두께를 20, 30, 및 50 nm 로 하여 GaAs/AlGaAs double hetero 구조로 성장하였다. 각 태양전지는 Zinc 도핑 된 p-type의 GaAs(100)기판에 p-type 도펀트로는 Beryllium을 n-type 도펀트로는 Silicon을 사용하여 p-i-n 구조의 태양전지를 제작하였다. 기판은 Molybdenum-block에 Indium을 이용하여 부착하였으며, 630 °C에서 산화막을 제거하고 590 °C에서 p-type GaAs 완충층을 250 nm 성장한 후 완충층 위에 InAs 양자점 및 InGaAs 양자우물을 500 °C에서 성장 하였다. 시료의 성장 중 III-V족 화합물의 비를 1:30 이상을 유지하였다. InAs 다중 양자점구조의 태양전지와 InGaAs 다중 양자우물구조의 태양전지의 에너지 밴드 다이어그램은 1D poisson 프로그램을 이용하여 설계하였고 구조는 Fig. 1과 같다.

### 1. p-i-n 구조의 다중 양자점 성장

자발형성 InAs 양자점을 Stranski-Krastanow (S-K)

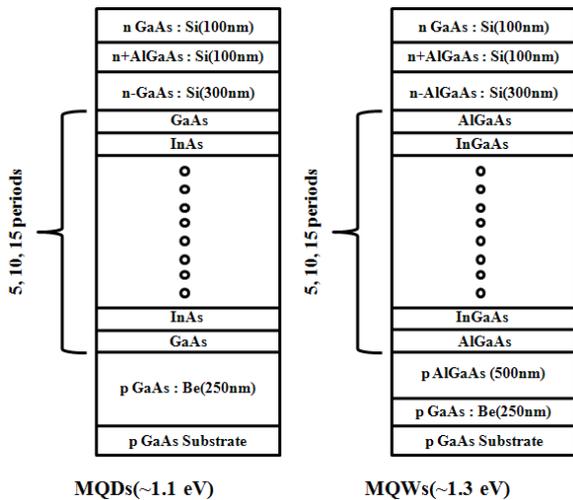


Figure 1. A schematic of InAs MQDs hetero-structure and  $Al_{0.3}GaAs_{0.7}/In_{0.12}Ga_{0.88}As$  MQWs.

방법으로 GaAs 기판위에 성장하였다. InAs 양자점은 500 °C에서 3.5 ML로 GaAs (10 nm)층 위에 다층으로 성장하였고 다중 양자점구조는 이중구조의 활성층에 삽입하였다.

### 2. p-i-n 구조의 다중 양자우물 성장

$In_{0.12}Ga_{0.88}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  양자우물구조는 500 °C에서 각각 10 nm 두께로 GaAs 완충층 위에 성장 하였다.  $In_{0.12}Ga_{0.88}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  다중 양자우물 구조는 이중구조의 활성층에 삽입하였다.

### 3. GaAs/AlGaAs 이중 이중접합의 성장

GaAs/AlGaAs 터널접합을 GaAs 기판위에 590 °C에서 GaAs의 두께를 20, 30, 및 50 nm로 설계하여 AlGaAs층 사이에 삽입한 구조로 성장하였다. 성장된 터널접합 시료는 AuGe/Ni로 저항성접합을 하고 420 °C에서 1분간 열처리를 거친 후 터널 다이오드 특성을 평가하였다.

InAs 다중 양자점과 InGaAs 다중 양자우물 성장 시 Reflection High-Energy Electron Diffraction (RHEED)을 이용해 실시간으로 제어하였고 성장된 InAs 다중 양자점과 InGaAs 다중 양자우물의 광학적, 구조적 특성은 Photoluminescence (PL) 측정과 Atomic Force Microscope (AFM)를 이용해 각각 분석하였다. PL은 Helium cryostat 내에서 532 nm 파장의 diode-pumped solid state laser를 이용하여 측정하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 RHEED 패턴 중 양자점 형성 시 나타나는 chevron 패턴과 양자점 표면의 AFM 이미지를 보여준다. 양자점의 적층주기가 증가할수록 양자점의 크기가 증가하고 chevron 패턴의 사이각은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)에서와 같이 양자점의 크기와 chevron 패턴사이의 관계를 통해 양자점의 크기를 실시간으로 제어할 수 있다 [11]. 또한 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 InAs 양자점의 적층주기가 증가할수록 5, 10, 및 15층의 InAs 다중 양자점 밀도는  $3.59, 2.96, \text{ 및 } 2.82 (10^{10}/\text{cm}^2)$ 로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

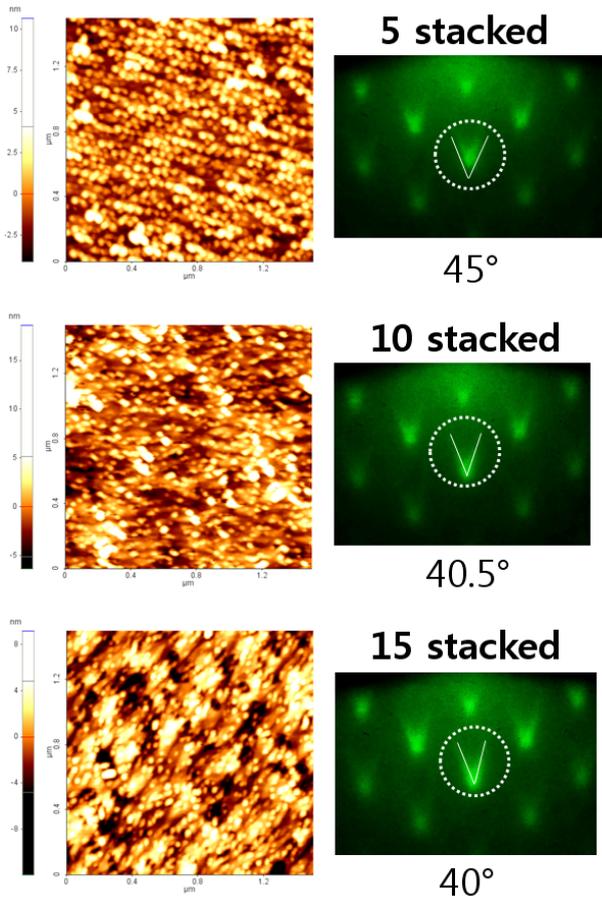


Figure 2. AFM surface images and RHEED images of multiple InAs quantum dots.

InAs 다중 양자점구조의 태양전지와 InGaAs 다중 양자우물구조의 태양전지의 광학적 특성은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 4는 20 K에서의 PL 데이터를 나타낸다. 5, 10, 및 15층의 InAs 다중 양자점구조에서의 PL 피크는 1.10, 1.16, 및 1.20 eV로 적층주기가 증가 할수록 PL 피크의 위치가 청색편이하는 것을 보여준다. 또한 상대강도가 가장 높은 5층의 InAs 다중 양자점구조에서 Full Width at Half Maximum (FWHM : 반치폭)이 57.6 meV을 나타내었다. 일반적으로 양자점의 광학적 특성 평가에서 PL 피크의 적색편이는 양자점의 적층시 위층의 양자점이 아래층의 양자점의 영향을 받는 구조적 coupling 현상에 의해 양자점의 크기와 장방비가 증가함에 따라 적색편이가 일어난다 [12,14]. 이는 양자점에 의한 양자기둑 효과로 양자점의 크기가 상대적으로 커짐에 의해서 양자점 내부에 존재하는 에너지 상태가 낮아지기 때문이다. 양자점 적층시 아래층의 양자점은 성장이 완료되는 시간까지 열처리됨으로서 계

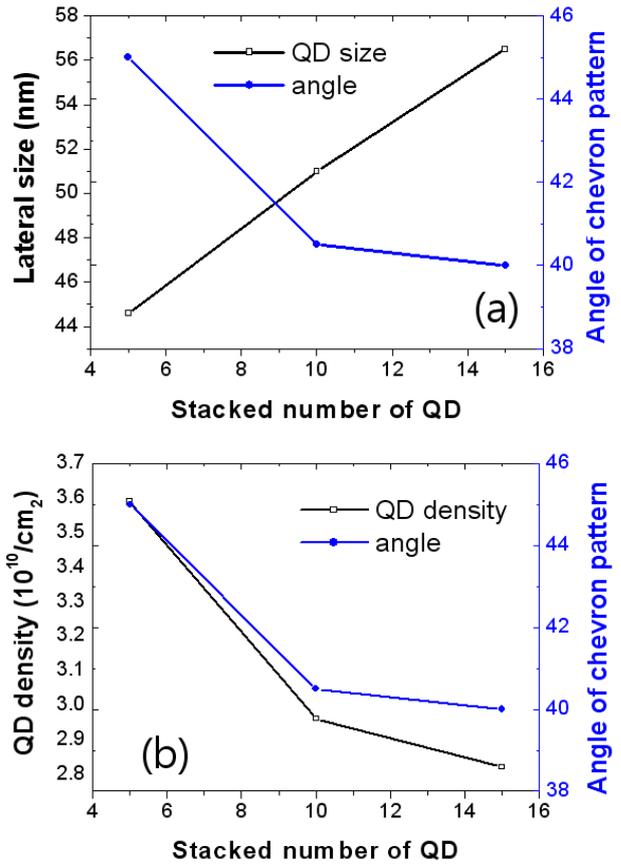


Figure 3. (a) The MQDs density and angle of chevron pattern, (b) Lateral size of QD and angle of chevron pattern.

면 근처의 adatom이 GaAs 덮개층으로 확산이 일어난다. 즉 적층주기가 증가 할수록 양자점의 열처리 시간이 길어지고 GaAs 덮개층으로 adatom의 확산이 증가하고 양자점의 장방비는 감소하게 된다. 즉, 양자점의 광학적 특성에서

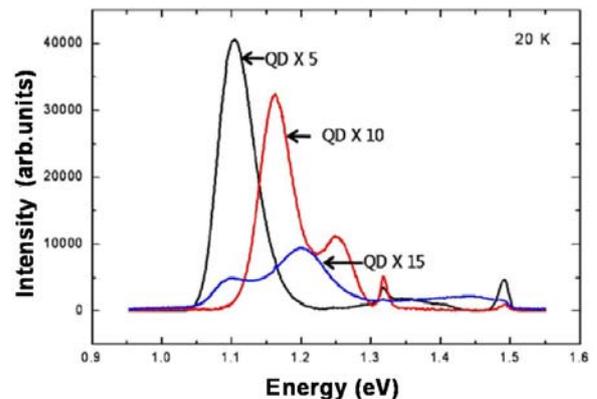


Figure 4. PL result of InAs MQDs.

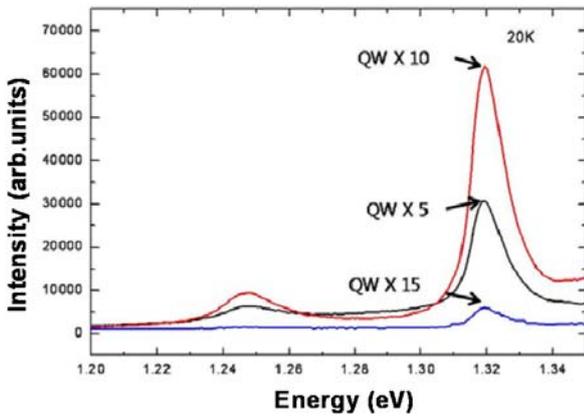


Figure 5. PL result of InGaAs/AlGaAs MQWs.

PL 피크의 청색천이는 적층주기가 증가할수록 양자점의 장방비가 감소한 결과이다 [13,14]. 또한 5, 10, 및 15층 모두에서 1.32 eV 근처에서 나타난 PL 피크는 InAs 양자점에서 GaAs 덮개층으로 확산이 일어나 생성된 InGaAs wetting layer의 PL 피크이다. 적층주기가 증가할수록 전체적인 양자점의 밀도가 증가하여 PL 피크의 강도와 반치폭은 증가하지만 양자점의 크기가 불균일해짐으로 인해서 PL 피크의 강도가 감소하였다.

Fig. 5의 InGaAs 다중 양자우물구조에서는 1.3 eV부근에서 5, 10, 및 15층의 PL 피크가 나타났고 10층의 InGaAs 다중 양자우물구조가 12.37 meV의 반치폭을 가지며 가장 높은 상대발광강도를 가지는 것을 볼 수 있다.

GaAs/AlGaAs double hetero 구조인 터널접합의 에너지 밴드 다이어그램은 1D poisson 프로그램을 이용하여 설계하였고 Fig. 6은 터널접합의 에너지 밴드 다이어그램 설계 및 시료의 구조 그리고 I-V 측정 결과이다. GaAs층의 두께가 30 nm 와 50 nm 에서는 터널 다이오드의 특성이 나타나지 않는 반면, 20 nm 에서는 터널 다이오드의 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. GaAs층의 두께가 얇아질수록 터널링이 잘 일어나 터널 다이오드의 특성이 나타나는 것이라 볼 수 있다.

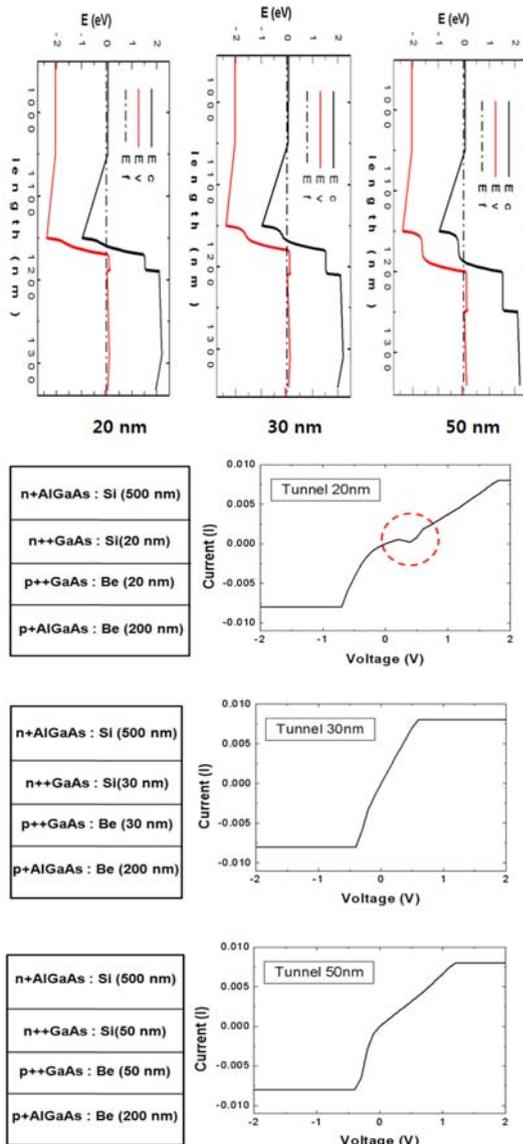


Figure 6. I-V results of GaAs/AlGaAs tunnel diode.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 탠덤형 태양전지를 제작하기 위해 1.1 eV 및 1.3 eV의 에너지대역의 흡수를 위해 InAs 양자점구조와 InGaAs 양자우물구조의 최적화를 위한 실험을 하였다. 5층 양자점 구조에서 양자점의 밀도는 높고 크기가 균일하여서 약 1.1 eV위치에 상대발광강도가 높게 나타났다. 10층의 양자우물구조에서는 1.3 eV의 위치에서 상대발광강도가 높은 특성을 보였다. 터널접합에서는 20 nm의 두께를 가지는 구조가 터널 다이오드의 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 실험의 결과를 바탕으로 탠덤형 태양전지에서 다중 양자점구조 및 다중 양자우물구조를 이용해 원하는 에너지 영역을 흡수하여 높은 에너지 변환효율이 예상된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0075597).

## 참고문헌

- [1] Lawrence L. Kazmerski, *J. Elec. Spectroscopy and Related Phenomena* **150**, 105 (2006).
- [2] K. A. Bertness, Sarah R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, C. Kramer, and J. M. Olson, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 989 (1994).
- [3] J. F. Geisz, aD. J. Friedman, J. S. Ward, A. Duda, W. J. Olavarria, T. E. Moriarty, J. T. Kiehl, M. J. Romero, A. G. Norman, and K. M. Jones, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 123505 (2008).
- [4] S. R. Kurtz, D. Myers, and J. M. Olson, *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* 875 (1997).
- [5] S. R. Kurtz, A. A. Allerman, E. D. Jones, J. m. Gee, J. J. Banas, and B. E. Hammons, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 729 (1999).
- [6] R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 183416 (2007).
- [7] Masafumi Yamaguchi, Tatsuya Takamoto, and Kenji Araki, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90**, 3068 (2006).
- [8] P. Wu, Y. Su, Y. C. Tzeng, H. Hong, K. Chu, and Y. Chen, *Semicond. Sci. Technol.* **22**, 549 (2007).
- [9] 정경욱, 김광웅, 유성필, 조남기, 박성준, 송진동, 최원준, 이정일, 양해석, *진공학회지* **16**, 371 (2007).
- [10] H. Sugiura, C. Amano, A. Yamamoto, and M. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, 269 (1988).
- [11] J. W. Lee, D. Schuh, M. Bichler, and G. Abstreiter, *Appl. Surf. Sci.* **228**, 306 (2004).
- [12] 권영수, 임재영, 이철로, 노삼규, 유연희, 최정우, 김성만, 이옥현, 류동현, 이동한, 박장환, *한국진공학회지* **8**, 450(1999).
- [13] 노삼규, 이상준, *Sae Mulli*, **51**, 191 (2005).
- [14] Jin Soo Kim, Jin Hong Lee, Sung Ui Hong, Won Seok Han, Ho-Sang Kwack, Chul Wook Lee, and Dae Kon Oh, *J. Appl. Phys.* **94**, 6603 (2003).

## Design and Growth of InAs Multi-Quantum Dots and InGaAs Multi-Quantum Wells for Tandem Solar Cell

Joongseok Cho<sup>a</sup>, Sanghyo Kim<sup>a</sup>, Suejeong Hwangboe<sup>b</sup>, Jaeho Jang<sup>a</sup>,  
Hyonkwang Choi<sup>a</sup>, and Minhyon Jeon<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*Department of Nano Systems Engineering, Center for Nano Manufacturing, Inje University, Gimhae 621-749*

<sup>b</sup>*Dyesol-timo, Research Institute of DSC, Seongnam 462-725*

(Received June 10, 2009, Revised July 28, 2009, Accepted August 5, 2009)

The InAs multi-quantum dots (MQDs) solar cell and InGaAs multi-quantum wells (MQWs) solar cell to cover 1.1 eV and 1.3 eV were designed by 1D poisson, respectively. The MQDs and MQWs of 5, 10, 15 layers were grown by molecular beam epitaxy. The photo luminescence results showed that the 5 period stacked MQDs have the highest intensity at around 1.1 eV with 57.6 meV full width at half maximum (FWHM). Also we can observe 10 period stacked MQWs peak position which has highest intensity at 1.31 eV with 12.37 meV FWHM. The density and size of QDs were observed by reflection high energy electron diffraction pattern and atomic force microscope. Futhermore, AlGaAs/GaAs sandwiched tunnel junctions were modified according to the width of GaAs layer on p-type GaAs substrates. The structures with GaAs width of 30 nm and 50 nm have backward diode characteristics. In contrast, tunnel diode characteristics were observed in the 20 nm of that of sample.

Keywords : Tandem solar cell, Quantum dot, Quantum well, Tunnel junction

\* [E-mail] mjeon@inje.ac.kr