

InAs/GaAs 양자점 태양전지에서 전하트랩의 영향

한임식^{a,c} · 김종수^a · 박동우^{b,c} · 김진수^b · 노삼규^{c*}

^a영남대학교 물리학과, 경산 712-749

^b전북대학교 신소재공학부, 전주 561-756

^c한국표준과학연구원 나노소재평가센터, 대전 305-340

(2012년 11월 18일 받음, 2013년 1월 21일 수정, 2013년 1월 29일 확정)

본 연구에서는 양자점(quantum dot, QD)에서의 전하트랩이 태양전지의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, GaAs 모체 태양전지(MSC)의 활성층에 InAs/GaAs QD를 삽입한 p⁺-QD-n/n⁺ 태양전지(QSC)를 제작하여 그 특성을 비교 조사하였다. Stranski-Krastanow (SK)와 준단층(quasi-monolayer, QML)의 2종류 QD를 도입하였으며, 표준 태양광(AM1.5)에서 얻은 전류-전압 곡선으로부터 태양전지의 특성인자(개방전압(V_{oc}), 단락전류(I_{sc}), 충만도(FF), 변환효율(CE))를 결정하였다. SK-QSC의 FF값은 80.0%로 MSC의 값(80.3%)과 비슷한 반면, V_{oc}와 J_{sc}는 각각 0.03 V와 2.6 mA/cm²만큼 감소하였다. V_{oc} 및 J_{sc} 감소 결과로 CE는 2.6% 저하되었는데, QD에 의한 전하트랩이 주요 원인으로 지적되었다. 전하트랩을 완화시키기 위한 구조로서 QML-QD 기반 태양전지를 본 연구에서 처음 시도하였으나, 예측과는 달리 부정적 결과를 보였다.

주제어 : 태양전지, 양자점, 준단층, 광여기 발광, 갈륨비소, 인듐비소

I. 서 론

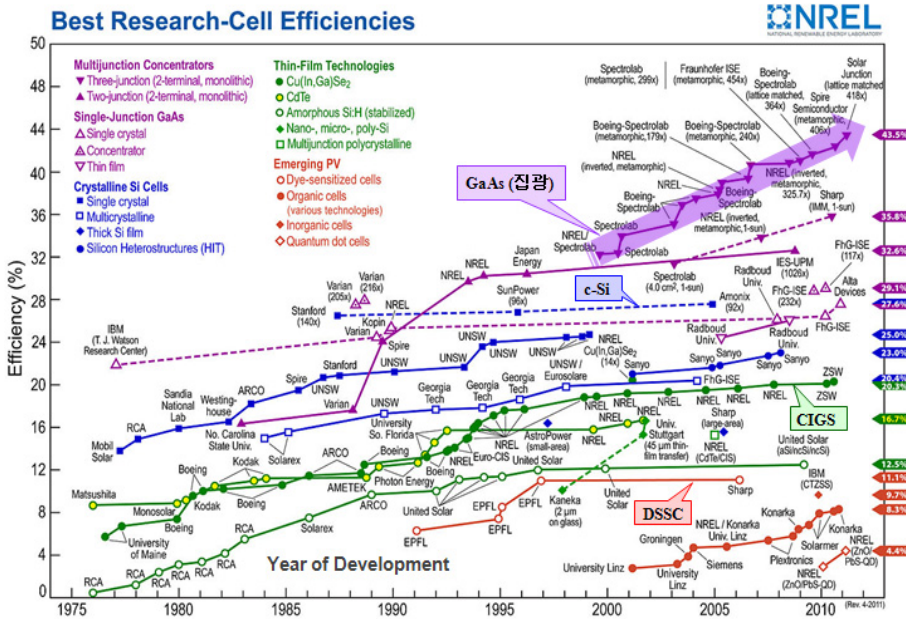
태양광을 전기에너지로 변환시키는 태양전지(solar cell)는 친환경적인 뿐만 아니라 가장 고효율의 에너지 재생 기술로서, 최근 효율 극대화를 위한 연구개발이 다양한 구조와 물질계에서 경쟁적으로 이루어지고 있다 [1-7]. Si, GaAs, CuInGaSe (CIGS), DSSC (dye-sensitive solar cell) 등이 그 대표적인 예로서, Fig. 1 [4]은 2011년 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 보고된 태양전지 효율을 정리한 도표이다. 최근까지 변환효율의 공식 최고기록은 GaAs계 집광형 태양전지가 달성한 40.7% (240 suns) [8]로서, 이론 예측 한계효율인 63.1% [9]를 향한 도전은 현재도 계속되고 있다(NREL 인증 세계 기록 효율은 2012년 3월 Solar Junction에서 발표한 43.5% [400 suns]이다).

GaAs계 화합물은 이론적으로 예측된 태양전지의 최적 에너지(1.4 eV)에 가장 근접한 밴드갭(1.42 eV, 300 K)을 가지고 있는 직접천이형 반도체로서, 간접천이형 Si 반도체 (1.1 eV, 300 K)에 비하여 변환효율이 높을 뿐만 아니라

(InGa)(AsP)계 사이의 이종접합이 가능하여 탠덤(tandem) 소자 제작에 적합한 장점을 지니고 있다 [10]. 또한, 근원적으로 집광한계(concentration limit)를 지니고 있는 Si 태양전지에 비하여 GaAs계 태양전지는 약 1,000배 정도 집광이 가능하며, 집광형 태양광 발전시스템에 그 활용이 기대되는 차세대 물질계로 알려져 있다 [11-14]. 최근, 단일광자(single photon)에 의한 다수 엑시톤 생성(multi-exciton generation, MEG) 가능성이 제안 [15]됨에 따라, 효율 극대화를 위한 중간밴드(intermediate band, IB)에 관한 연구 [16-19]가 급증하고 있다. GaAs계 양자점(quantum dot, QD)의 부준위(sublevel)가 MEG 구현에 적합한 IB를 제공할 수 있음이 알려짐에 따라 QD 기반 태양전지(QD-based solar cell, QSC)에 관한 연구개발이 본격화되고 있다 [20-31].

Fig. 2는 QD에서의 MEG 현상을 도식화한 개념도(Nozik 등 [20,21])이다. MEG에 기반한 QSC [22,23] 구현에는 부준위 변조기술이 선행되어야 하는데, 밴드갭 변조와 적층 조절이 비교적 자유로운 (InAlGa)As계 QD가 유력한 후보로 관련 기초 연구가 활발히 진행되고 있다

* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr



L. Kazmerski, Data file at National Renewable Energy Laboratory (2011).

Figure 1. A figure reported by NREL [4] in 2011 that shows development of the solar cell efficiency in chronological order.

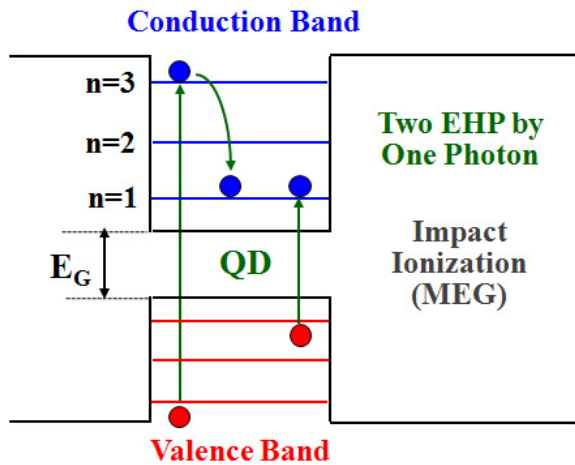


Figure 2. Schematic energy band diagram that sketches a concept of the MEG phenomena in QD structure [21].

[24-31]. 현재까지 (InGa)As/GaAs QD 기반 태양전지로 달성한 최대 효율은 19% 정도로서 아직 초보적인 연구단계에 머물러 있으나, QD 태양전지의 최대 약점인 전하트랩(carrier trap) 문제가 해결되고 QD-MEG가 실현되면 태양전지 기술이 한 단계 도약하는 전기가 마련될 것으로 전망된다.

본 논문에서는 GaAs 모체 태양전지(matrix solar cell, MSC)와 함께 MSC 활성층에 Stranski-Krastanow (SK)

[32] 및 준단층(quasi-monolayer, QML) InAs/GaAs QD [33]를 삽입한 $p^+-(QD)-n$ QSC를 각각 제작하여, 3종류 태양전지의 광여기 전류-전압 특성을 비교 논의하였다. 최근 많은 논문 [20-27]에서 보고되고 있는 바와 같이, 본 결과에서도 QD의 전하트랩에 의한 특성 저하가 관측되었다. 본 논문에서 처음 시도한 젖음층(wetting layer, WL)이 없는 QML-QD를 삽입한 QSC를 소개하고, MSC 및 SK-QSC와의 비교를 통하여 QD에 의한 전하트랩이 태양전지 특성에 미치는 영향을 보고한다.

II. 실험 방법

Fig. 3(a)는 본 연구에서 제작한 $p^+-(QD)-n/n^+$ 접합 MSC/QSC 소자의 층구조 개략도이다. QSC 층구조는 활성층 내에 InAs/GaAs SK-QD 또는 QML-QD를 추가한 것 이외에는 기본적으로 GaAs-MSC 구조와 같다. n^+ -GaAs 기판 위에 MBE (molecular beam epitaxy) 방법으로 n -GaAs:Si 완충층(buffer)과 베이스층(base)을 차례로 성장하였으며, 이때 층두께/Si 도핑밀도는 각각 $300 \text{ nm}/2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 와 $1.5 \mu\text{m}/2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이다. p^+ -GaAs:Be 에미터층(emitter, 600 nm)과 덮개층(cap layer, 10 nm) 사이에는 50 nm 두께의 p^+ - $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}:\text{Be}$ 투과층(window)을 삽입하였으며,

이때 Be 도핑밀도는 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이다. SK-QSC와 QML-QSC에 적용한 InAs-QD/GaAs의 유효두께(equivalent thickness)는 각각 2.0 ML/40 nm와 1.5 ML/15 ML이며, QD 적층 주기는 각각 16과 10이다.

Fig. 3(b)는 표면반사에 의한 손실을 줄이기 위하여 소자에 도포한 MgF_2/ZnS 복층 무반사막(anti-reflecting coating, ARC)의 AFM ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) 사진이다. p^+ -GaAs 덮개층 위에 열증착법(thermal evaporation)으로 150°C 에서 증착하였으며, Surface Profiler (Dektak 150)로 결정한 복층 MgF_2/ZnS 의 두께는 130/40 nm이었다. 타원편광법(spectroscopic ellipsometry)으로 분석한 GaAs 태양전지의 흡수 중심파장(650 nm)에서의 복층 MgF_2/ZnS 의 굴절률은 1.39/2.31로서, 단층 MgF_2 와 ZnS의 보고 값 [34, 35], 1.4, 2.5와 잘 일치하였다.

광마스크에 의한 전형적인 광묘화기법(photolithography)으로 메사(mesa)와 표면전극(finger) 패턴을 각각 형성하고, 전자빔(e-beam)으로 전극금속을 증착하여 시료를 완성하였다. 표면전극의 선폭과 간격은 각각 $20 \mu\text{m}$ 와 $400 \mu\text{m}$ 이며, 전선 연결을 위한 전극판(electrode pad, $200 \times 200 \mu\text{m}^2$)은 대칭성을 유지하도록 양 끝에 위치시켰다. 단위소자의 메사 형성에는 비교적 빠른 식각속도($\sim 85 \text{ nm/s}$)를 가지는 [Citric-acid : H_2O = 20 : 1] 용액을 사용하였으며, ARC 식각에는 [HCl : HF = 1 : 1] 용액을 이용하였다. p형 표면전극과 n형 후면전극은 GaAs계 오믹금속으로 널리 사용되고 있는 Au-Zn/Ni/Au (80/15/200 nm)와 Au/Ge/Ni/Au (26/54/15/200 nm) 다층박막을 각각 사용하였으며, 200°C 와 375°C 에서 급속열처리(rapid thermal annealing, RTA)하여 오믹접촉을 형성시켰다.

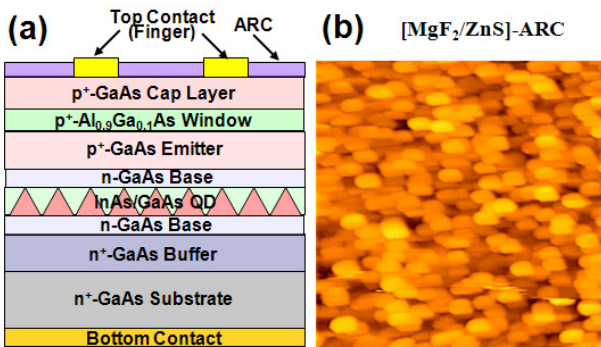


Figure 3. (a) Schematic layer structure of GaAs-MSC and InAs/GaAs-QSC samples, and (b) AFM image of $[\text{MgF}_2/\text{ZnS}]$ -ARC used in this study.

태양전지 특성평가에는 상용 태양전지 시험기(solar simulator)를 이용하였다. 표준 태양광원(AM1.5, 100 mW/cm^2) 환경에서 전류-전압 곡선(I-V)을 측정하여 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc}), 단락전류(short-circuit current, I_{sc}), 충전도(fill factor, FF), 변환효율(conversion efficiency, CE) 등을 동시에 결정하였다. 시료장착대에는 열전대(thermocouple)와 열전냉각기(TE-cooler)를 장치하여 시료의 온도를 유지하도록 제작하였으며, 이때 온도오차는 약 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이다.

III. 결과 및 논의

1. SK-QD 및 QML-QD의 형상과 발광 스펙트럼

Fig. 4는 MBE 성장법으로 형성한 InAs/GaAs (a) SK-QD와 (b) QML-QD의 대표적인 표면 AFM (atomic force microscopy, 위)과 단면 TEM (transmission electron microscopy, 아래) 컷을 갖는 SK-QD ($> \text{WL}$) 사진은 명확한 모양을 보여주는 반면, WL이 없이 형성된 준단층 두께의 QML-QD ($< \text{WL}$)는 크기가 작기 때문에 AMF이나 TEM으로도 분명하게 형태를 관측하기가 쉽지 않음을 보여주고 있다. 본 연구에서는 QSC 시

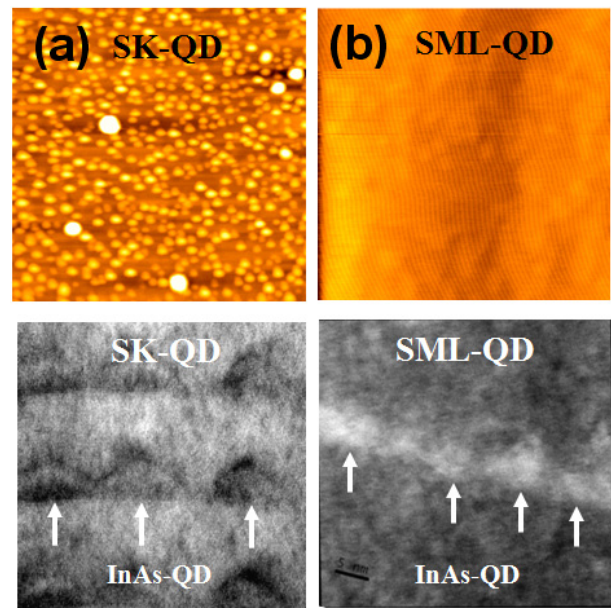


Figure 4. Typical AFM (upper) and TEM (lower) images for (a) SK-QD and (b) QML-QD.

료를 도입한 SK-QD와 QML-QD의 여기발광(photoluminescence, PL) 스펙트럼을 조사하여 QD의 형성과 부준위 에너지의 상대적 위치를 확인하였다 [33].

Fig. 5(a)는 SK-QD (2.0 ML)와 QML-QD (1.5 ML) 구조로부터 얻은 PL 스펙트럼(10 K)을 WL (1.7 ML)와 비교한 그래프이다. InAs 두께가 1.5 ML (< WL)에서 1.7 ML로 증가하면 PL 피크는 1.318 eV에서 1.407 eV로 청색변위(blueshift)를 보이는 반면, 1.7 ML에서 2.0 ML (> WL)로 증가할 경우에는 1.407 eV에서 1.234 eV로 급격한 적색변위(redshift)를 나타낸다. WL의 PL 피크 에너지(1.407 eV)가 QD 에너지보다 큰 것은 InAs-WL/GaAs는 양자우물(quantum well, QW) 특성을 나타내기 때문이다. PL 피크의 변위는 WL 두께(1.7 ML)를 중심으로 WL가 없는 QML-QD에서 WL가 있는 SK-QD로 모드 전이(mode transition)가 일어남을 알 수 있는데, 이것은 QML-QD의 형성을 입증해 주는 결과이다. Fig. 5(b)는 100 K 온도에서 얻은 PL 스펙트럼이다. PL 스펙트럼은 강한 QML-QD 피크(1.302 eV)와 함께 아주 미약한 SK-QD 피크(~1.2 eV)를 보여주고 있는데, 이것은 QML-QD이 성장될 때 극소수

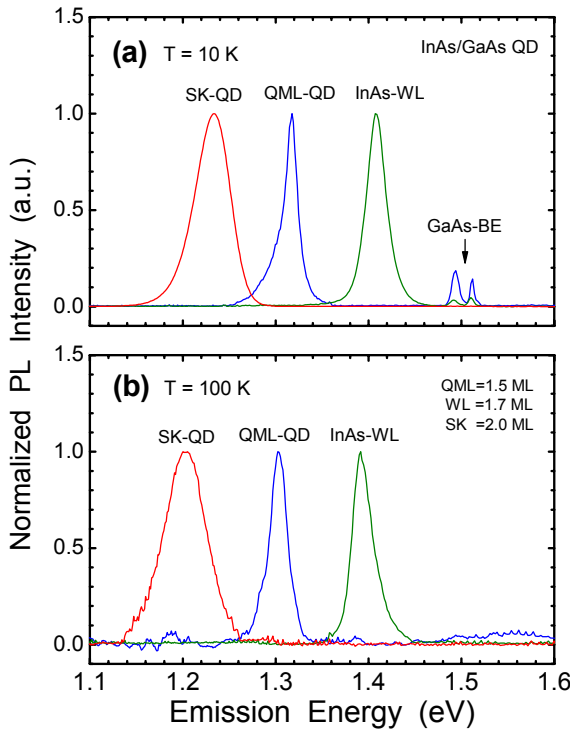


Figure 5. PL spectra taken from SK-QD (2.0 ML), WL (1.7 ML), and QML-QD (1.5 ML) structures at (a) 10 K and (b) 100 K.

의 SK-QD가 동시에 형성됨을 보여주는 결과로 해석된다.

2. SK-QD 기반 InAs/GaAs QSC 특성

Fig. 6(a)는 GaAs MSC와 InAs/GaAs SK-QSC에서 얻은 암전류밀도-전압(dark J-V) 특성 곡선이다. MSC에 비하여 QSC의 전류밀도는 다소 급격한 증가를 보이는데, 이것은 높은 인가전압에서는 QD 부준위에 트랩된 전하가 재방출(reemission)되어 전류에 참여한 결과로 이해된다. Fig. 6(b)는 AM1.5에서 측정된 광조사 전류밀도-전압(illuminated J-V) 특성곡선이다. MSC와 비교하여, 0.3 V의 V_{OC} 감소와 동시에 2.6 mA/cm^2 의 J_{SC} 감소가 관측되었으며, 결과적으로 2.6%의 효율저하를 보였다. QD가 없는 MSC보다 특성이 저하된 것은 광조사에 의하여 여기된 전자-정공쌍(electron-hole pair, EHP)이 QD에 트랩되어 전류에 기여하지 못한 결과로 해석된다.

Fig. 6(b)의 특성곡선은 QD에 의한 전하트랩은 전류밀도와 효율에 결정적인 영향을 미침을 잘 보여주고 있는데, 이것은 장벽층(GaAs)의 에너지보다 낮은 QD 부준위에 포획된 전하가 전류에 기여하지 못한 결과이다. 최근 이러한

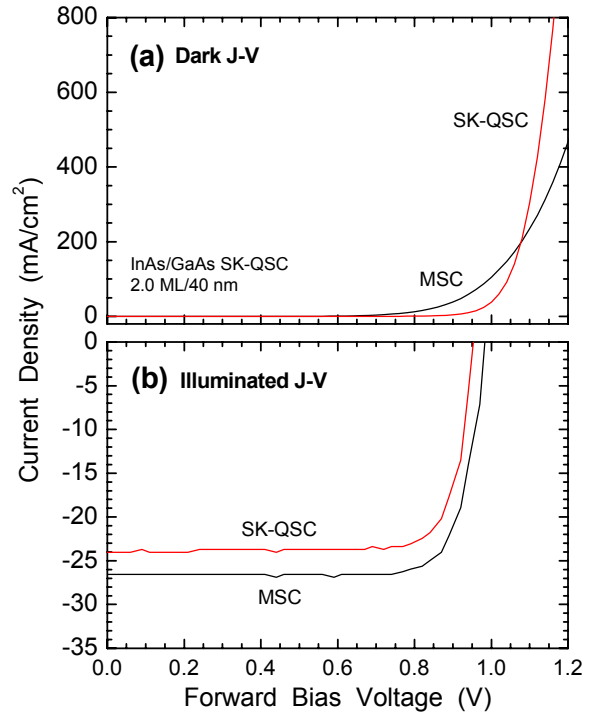


Figure 6. (a) Dark and (b) illuminated J-V characteristic curves for GaAs-MSC and InAs/GaAs-QSC.

문제를 해결하기 위하여 조사광의 흡수로 생성된 EHP가 QD에 포획되지 않고 가능한 한 많은 전하가 추출되어 전류에 기여할 수 있는 다양한 구조가 제안되고 있는데, 응력완화 구조 [25-27], (AlInGa)As 장벽 [29-31] 등이 그 대표적인 예이다.

본 연구에서는 전하트랩을 최소화시키고 포획된 전하의 재방출을 용이하게 하는 구조로서, QD 부준위가 기판 GaAs 밴드단(bandedge, BE)에 보다 근접해 있는 QML-QD 구조를 도입하였다. WL가 없는 QML-QD는 크기가 작아서 QD 밀도를 증가시킬 수가 있고, QD 적층에서 발생하는 응력축적(strain accumulation)을 줄일 수 있는 기술로 알려져 있다. 본 논문에서는 태양전지 활성층에 InAs/GaAs QML-QD를 삽입한 QSC를 제작하여 그 형성기구와 특성을 비교 분석하였으며, SK-QD보다 밴드단차가 낮기 때문에 전하트랩의 완화가 기대된다.

3. QML-QD 기반 InAs/GaAs QSC 소자 특성

InAs/GaAs QML-QD를 태양전지 활성층에 삽입한 p^+-QD-n/n^+ QSC를 제작하여 특성을 분석하였다. SK-QD를 대신에 1.5 ML의 QML-QD를 적층한 것 이외에는 Fig. 3(a)의 층구조와 동일하다. Fig. 7은 QML-QSC의 LJ-V 곡선을 GaAs MSC 및 SK-QSC의 곡선과 비교해 놓은 그래프이며, Table 1은 각 태양전지의 특성인자를 제시한 표이다. 예측과는 달리, QML-QSC에서도 SK-QSC와 유사한 특성저하가 관측되었다. SK-QSC의 값과 비교해 볼 때 V_{oc} 에는 변화가 없었으나 J_{sc} 는 1.9 mA/cm^2 줄어들었으며, 결과적

으로 1.1%의 효율감소를 나타내었다. FF값이 1.3% 증가한 것은 활성층 두께의 감소로 소자의 직렬저항이 줄어들었기 때문으로 추정된다. 밴드단차가 더 낮음에도 불구하고 전하트랩에 의한 특성저하가 더 심각함을 고려할 때, QML-QSC에는 GaAs 덮개층과 QD 사이의 계면결함에 의한 전하트랩도 상당히 개입되어 있는 것으로 사료된다.

QD에 의한 전하트랩이 QD 기반 태양전지의 효율 개선을 위한 선결 과제는 분명한 사실로 밝혀졌다. 이와 함께 추가로 고려되어야 할 문제는 다음의 2가지를 들 수가 있다. 첫 번째는 낮은 QD 밀도이다. QML-QD의 형상은 AFM이나 TEM 사진으로도 얻기 어렵기 때문에 정확한 값을 제시할 수는 없지만 QML-QD의 밀도는 SK-QD ($\text{mid-}10^{11} \text{ cm}^{-2}$) 밀도보다 높을 것으로 추정되나, 고효율의 태양전지에 적용되기에는 여전히 낮은 값이다. InAs/GaAs계는 비교적 응력이 큰 물질계이므로 QD 밀도와 적층수를 높일 수 있는 응력이 작은 물질계의 도입이 하나의 대안이 될 것이다. 두 번째는 InAs/GaAs QD의 높은 밴드단차이다. QML-QD의 도입으로 SK-QD보다 0.15 eV 정도 밴드단차를 낮추었으나, 여전히 GaAs-BE와는 약 0.2 eV의 높은 밴드단차를 가지고 있다. 이를 줄이기 위해서는 InAs/GaAs 밴드단차보다 작은 QD 물질계의 도입이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구에서 시도한 InAs/GaAs QD 보다 응력과 밴드단차가 작으면서 이상의 조건을 모두 만족하는 QD계에는 InAs-QD/InGaAs가 있는데, 이 계를 태양전지 활성층에 도입할 경우 QD 밀도의 증가와 함께 QD와 QD/GaAs 계면에서의 전하트랩을 대폭 완화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

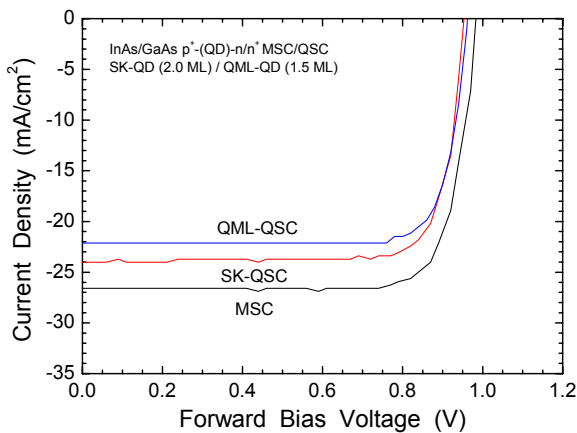


Figure 7. LJ-V characteristic curves of GaAs MSC and InAs/GaAs SK-QSC and SML-QSC.

IV. 요약 및 결론

GaAs MSC 활성층에 InAs/GaAs SK-QD 및 QML-QD를 삽입한 p^+-QD-n/n^+ 양자점 태양전지(QSC)를 각각 제작하

Table 1. Solar cell parameters of MSC, SK-QSC, and QML-QSC.

Cell parameters	MSC	SK-QSC	QML-QSC
V_{oc} (V)	0.99	0.96	0.96
J_{sc} (mA/cm^2)	26.6	24.0	22.1
Fill factor (%)	80.3	80.0	81.3
Efficiency (%)	21.0	18.4	17.3

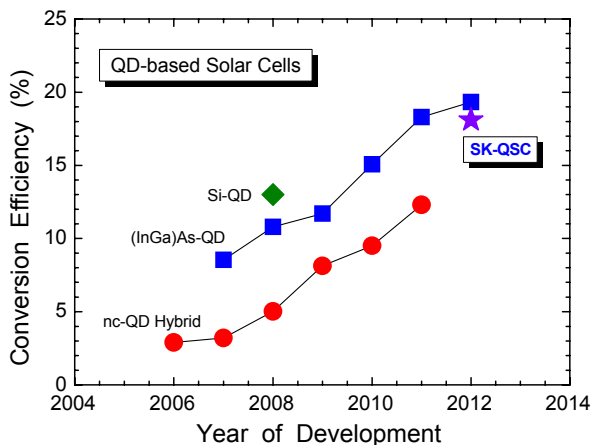


Figure 8. A plot on the solar cell efficiency reported for QD-based solar cells with a result (SK-QSC) obtained in this study.

여 그 특성을 조사하였다. 광여기 전류-전압 곡선으로부터 태양전지 특성인자(V_{oc} , J_{sc} , FF, CE)를 결정하였으며, MSC 특성과의 비교를 통하여 SK-QSC와 QML-QSC에서는 QD에 의한 전하트랩이 소자의 특성을 저하시킴을 보였다. SK-QSC 및 QML-QSC의 V_{oc}/J_{sc} 는 각각 MSC의 값보다 0.3 V/2.6 mA/cm²와 0.3 V/4.5 mA/cm² 감소하였고, 이때 효율은 각각 2.6%와 3.7% 줄어들었다. 본 연구결과로부터, QD 기반 태양전지의 특성 개선을 위해서는 전하트랩 완화시킬 수 있는 기술적 돌파구가 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 8은 현재까지 보고된 대표적인 QD 기반 태양전지의 효율을 연대별로 정리한 그래프이다. (InGa)As계 QSC의 효율은 Si-QD나 nc-QD (nano-crystalline QD) 기반 태양전지와 비교할 때 상대적으로 높은 효율을 가지고 있고, 특성저하에도 불구하고 본 연구결과(18.1%, SK-QSC)는 세계기록(19.3%)에 상당히 근접해 있음을 보여주고 있다. QSC의 특성 향상을 위한 새로운 구조로서, 본 연구에서 시도한 InAs/GaAs QD 보다 낮은 응력과 밴드단차를 가지고 있고 양자점 적외선검출소자(QDIP) [36,37]에 성공적으로 적용된 바 있는 InAs/InGaAs QD계를 대안으로 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. NRF-2009-C1AAA001-0093212/253)임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells* (Imperial College Press, London, 2003).
- [2] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **18**, 144 (2010).
- [3] F. Dimroth and S. Kurtz, *MRS Bull.* **32**, 230 (2007).
- [4] L. Kazmerski, *Best Research-Cell Efficiencies* (NREL Compilation, Golden, 2011).
- [5] S. J. Tark, M. G. Kang, S. Park, J. H. Jang, J. C. Lee, W. M. Kim, J. S. Lee, and D. Kim, *Curr. Appl. Phys.* **9**, 1318 (2009).
- [6] C. H. Son, K. M. Kim, J. H. Kim, J. Hong, and G. C. Kwon, *J. Korean Vac. Soc.* **21**, 55 (2012).
- [7] Y. H. Ko, D. H. Joo, and J. S. Yu, *J. Korean Vac. Soc.* **21**, 99 (2012).
- [8] 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**, 183516 (2007).
- [9] A. Luque and A. Marti, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5014 (1997).
- [10] R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, D. D. Krut, H. Ermer, R. A. Sherif, and N. H. Karam, *Adv. Optoelectron.* **2007**, 1 (2007).
- [11] M. Hermle, G. Létay, S. P. Philipps, and A. W. Bett, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* **16**, 409 (2008).
- [12] A. Khan, M. Yamaguchi, and T. Takamoto, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3098 (2004).
- [13] K.-S. Lee, Y. D. Chung, N. M. Park, D. H. Cho, K. H. Kim, J. Kim, S. J. Kim, Y. Kim, and S. K. Noh, *J. Opt. Soc. Korea* **14**, 321 (2010).
- [14] M.-J. Yang and M. Yamaguchi, *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* **60**, 19 (2000).
- [15] R. J. Ellingson, M. C. Beard, J. C. Johnson, P. Yu,

- O. I. Micic, A. J. Nozik, A. Shabaev, and A. L. Efros, *Nano Lett.* **5**, 865 (2005).
- [16] R. D. Schaller, M. Sykora, J. M. Pietryga, and V. I. Kilmov, *Nano Lett.* **6**, 424 (2006).
- [17] M. C. Beard, K. P. Knutsen, P. Yu, J. M. Luther, Q. Song, W. K. Metzger, R. J. Ellingson, and A. J. Nozik, *Nano Lett.* **7**, 2506 (2007).
- [18] A. Luque and A. Marti, *Phys. Adv. Mater.* **22**, 160 (2010).
- [19] S. P. Bremner, M. Y. Levy, and C. B. Honsberg, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171110 (2008).
- [20] A. J. Nozik, *Physica E* **14**, 115 (2002).
- [21] A. Luque, A. Marti, and A. J. Nozik, *MRS Bull.* **32**, 236 (2007).
- [22] A. Marti, E. Antolin, E. Canovas, N. Lopez, P. G. Linares, A. Luque, C. R. Stanley, and C. D. Farner, *Thin Solid Films* **516**, 6716 (2008).
- [23] K. A. Sablon, J. W. Little, V. Mitin, A. Sergeev, N. Vagidov, and K. Reinhardt, *Nano Lett.* **11**, 2311 (2011).
- [24] Y. Okada, R. Oshima, and A. Takata, *J. Appl. Phys.* **106**, 024306 (2009).
- [25] S. M. Hubbard, C. D. Cress, C. G. Bailey, R. P. Raffaele, S. G. Bailey, and D. M. Wilt, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 123512 (2008).
- [26] C. G. Bailey, D. V. Forbes, R. P. Raffaele, and S. M. Hubbard, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 163105 (2011).
- [27] D. Zhou, P. E. Vullum, G. Sharma, S. F. Thomassen, R. Holmestad, T. W. Reenaas, and B. O. Fimland, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 083108 (2010).
- [28] D. Guimard, R. Morihara, D. Bordel, K. Tanabe, Y. Wakayama, M. Nishioka, and Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 203507 (2010).
- [29] K. A. Sablon, J. W. Little, K. A. Olver, Zh. M. Wang, V. G. Dorogan, Yu. I. Mazur, G. J. Salamo, and F. J. Towner, *J. Appl. Phys.* **108**, 074305 (2010).
- [30] T. Gu, M. A. El-Emawy, K. Yang, A. Stintz, and L. F. Lester, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 261106 (2009).
- [31] C. Y. Ngo, S. F. Yoon, W. K. Loke, T. K. Ng, and S. J. Chua, *J. Cryst. Growth* **311**, 1885 (2009).
- [32] J. W. Choe, J. O. Kim, and S. K. Noh, *J. Korean Phys. Soc.* **60**, 51 (2012).
- [33] Y. H. Kim, S. J. Kim, S. K. Noh, Jong S. Kim, and Jin S. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* **60**, 1785 (2012).
- [34] D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics 87 ed.* (CRC Press, London, 1998), p. 4-67.
- [35] H. H. Li, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **13**, 103 (1984).
- [36] A. V. Barve, S. J. Lee, S. K. Noh, and S. Krishna, *Laser & Photon. Rev.* **4**, 738 (2010).
- [37] S. J. Lee, Z. Ku, A. Barve, J. Montoya, W.-Y. Jang, S. R. J. Brueck, M. Sundaram, A. Reisinger, S. Krishna, and S. K. Noh, *Nature Commun.* **2**, 286 (2011).

Influence of Carrier Trap in InAs/GaAs Quantum-Dot Solar Cells

Im Sik Han^{a,c}, Jong Su Kim^a, Dong Woo Park^{b,c}, Jin Soo Kim^b, and Sam Kyu Noh^{c*}

^a*Department of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749*

^b*Faculty of New Materials Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756*

^c*Nano Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340*

(Received November 18, 2012, Revised January 21, 2013, Accepted January 29, 2013)

In order to investigate an influence of carrier trap by quantum dots (QDs) on the solar parameters, in this study, the p^+ -QD- n/n^+ solar cells with InAs/GaAs QD active layers are fabricated, and their characteristics are investigated and compared with those of a GaAs matrix solar cell (MSC). Two different types of QD structures, the Stranski-Krastanow (SK) QD and the quasi-monolayer (QML) QD, have been introduced for the QD solar cells, and the parameters (open-circuit voltage (V_{OC}), short-circuit current (I_{SC}), fill factor (FF), conversion efficiency (CE)) are determined from the current-voltage characteristic curves under a standard solar illumination (AM1.5). In SK-QSC, while FF of 80.0% is similar to that of MSC (80.3%), V_{OC} and J_{SC} are reduced by 0.03 V and 2.6 mA/cm², respectively. CE is lowered by 2.6% as results of reduced V_{OC} and J_{SC} , which is due to a carrier trap into QDs. Though another alternative structure of QML-QD to be expected to relieve the carrier trap have been firstly tried for QSC in this study, it shows negative results contrary to our expectations.

Keywords : Solar cell, Quantum dot, Quasi-monolayer, Photoluminescence, Gallium arsenide, Indium arsenide

* [E-mail] sknoh@kriss.re.kr