

수광층의 카바이드 함량 변화에 따른 실리콘 이종접합 태양전지 특성 변화

김현성¹, 김상호², 이영석², 정준희², 김용준¹, 다오빈 아이¹, 이준신^{1,2,a}

¹ 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과

² 성균관대학교 에너지과학과

Enhancing Solar Cell Properties of Heterojunction Solar Cell in Amorphous Silicon Carbide

Hyunsung Kim¹, Sangho Kim², Youngseok Lee², Yongjun Kim¹, Vinh Ai Dao¹, and Junsin Yi^{1,2,a}

¹ School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received April 11, 2016; Revised May 24, 2016; Accepted May 24, 2016)

Abstract: In this paper, the efficiency improvement of the heterojunction with intrinsic thin layer (HIT) solar cells is obtained by optimization process of p-type a-SiC:H as emitter. The optoelectronic of p-type a-SiC:H layers including the optical band-gap and conductivity under the methane gas content variation is conducted in detail. A significant increase in the J_{sc} by 1 mA/cm² and V_{oc} by 30 mV are attributed to enhanced photon-absorption due to broader band-gap of p-a-SiC:H and reduced band-offsets at p-side interface, respectively of HIT solar cells.

Keywords: Heterojunction solar cell, Wide bandgap, Carbide, Conductivity, Absorption

1. 서 론

이종접합 태양전지는 상용 결정질 태양전지에 비해 서 태양전지 고효율화를 위한 제작 공정의 단계가 적고 일반적으로 200°C 이하의 저온 공정이 가능하여 높은 개방전압을 갖는 고효율 태양전지로 차세대 초박형 기판에 적용할 수 있는 기술이다. 일본의 Panasonic 사가 가장 높은 기술력을 보유하고 있는 본 소자는 진

성 a-Si:H을 사용하여 결정질 실리콘(C-Si) 웨이퍼 표면을 표면 처리함으로써 이종접합 태양전지의 계면에 표면의 재결합을 억제하여 24.7% 변환 효율과 750 mV 이상의 개방전압을 달성하였다 [1].

하지만 기존의 이종접합태양전지에서 C-Si 웨이퍼에서 생성할 수 있는 캐리어의 양은 제한적일 수밖에 없다. 일반적으로 n-type C-Si 웨이퍼에서 p-type a-Si:H 막은 수광층으로 사용한다. P-type a-Si:H막은 파장 700 nm 이하에서는 매우 높은 흡수도를 가지고 수광층에서는 캐리어를 생성하지 않는다 [2]. 이에 수광층에서 흡수도가 낮은 광대역 밴드갭 물질들에 대해 연구해 왔다. a-SiC:H [3], a-SiOx:H [4], μ c-Si:H [5], μ c-SiOx:H [6], μ c-SiC:H [7] 등 p-type a-Si:H

a. Corresponding author; yi@yurim.skku.ac.kr

막을 대신할만한 수광층에 대하여 연구가 되어져 왔다.

본 연구는 이종접합 태양전지에서 수광층으로 사용하는 p-type a-Si:H막 대신하는 p-type a-SiC:H 박막의 막 내의 카바이드 함량 변화에 따른 전기적, 광학적 특성을 분석하였다. 지금까지 p-type a-SiC:H 박막에 대한 연구는 박막 내의 카바이드 함량이 증가하면 막의 광 흡수도가 감소하며 전기전도도가 감소함을 알 수 있다 [8]. 이러한 박막의 특성을 일반적으로 적용한 분야는 박막 실리콘 태양전지이다 [9,10]. 본 연구에서는 주로 박막 태양전지에서 이용되어 왔던 p-type a-SiC:H 박막을 이종접합 태양전지에 적용하여 최적화 하는 작업을 진행하였다. 이종접합 태양전지와 박막 태양전지에서의 흡수층은 각각 결정질 실리콘과 비정질 실리콘이므로 밴드갭의 차이가 있다. 따라서 p-type a-SiC:H 박막을 이종접합 태양전지에 적용하기 위해서는 곡선인자 및 개방전압의 주요 하락 인자인 밴드 오프셋을 최소화하기 위한 차별화된 접근이 필요하다.

시뮬레이션을 통하여 수광층의 과도하게 낮은 전도도가 이종접합 태양전지에서 생성된 캐리어의 수집에 미치는 영향과 밴드 다이어그램 상에서의 캐리어의 수집 메커니즘을 분석하였다. 또한 카바이드 함량 변화에 따른 박막 특성 변화와 시뮬레이션 데이터에 근거하여 이종접합 태양전지를 제작하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서 제작하고 분석한 이종접합 태양전지의 구조와 증착방법은 다음과 같다. P-type a-SiC:H 막을 증착하기 위하여 플라즈마 화학 기상 증착법을 이용하여 증착하였고, 본 논문에서 제시하는 p-type a-SiC:H의 증착 조건은 아래 표에 나타내었다. 투명전극으로 상부면에 증착된 ITO는 6인치 세라믹 타겟을 사용하는 Pulsed DC magnetron 스퍼터링 시스템 (Planar Batch-Sputtering System, PSP 5000 Series, Korea)을 이용하였다. 전극 증착은 ITO 막 위에 열기상증착기(Thermal Evaporator, UTE Series, Korea)를 이용하여 전면에 Al/Ag를 metal grid 형태로 증착하였고 후면에는 Al을 전면 증착하였다.

본 논문의 소자의 구조는 Al(500 nm)/Ag(200 nm)/ITO(200 nm)/P-Type a-SiC:H(7 nm)/I-type a-Si:H(10 nm)/N-type c-Si Wafer (200 μm)/N-type a-Si:H(10 nm)/ rear metal이다.

Table 1. Deposition condition of p-type a-SiC:H.

P-type a-SiC:H	
SiH ₄ (sccm)	3
B ₂ H ₆ (1% in H ₂)(sccm)	9
CH ₄ (sccm)	0~15
Pressure(mtorr)	100
Power(W)	10
Deposition temperature(°C)	210

3. 결과 및 고찰

그림 1을 보면 p-type a-SiC:H막의 카바이드 함량이 증가함에 따라 밴드갭은 1.7 eV에서 2.2 eV까지 증가하고 전도도는 3.0×10⁻⁴ s/cm에서 1.0×10⁻⁷ s/cm까지 낮아짐을 알 수 있다.

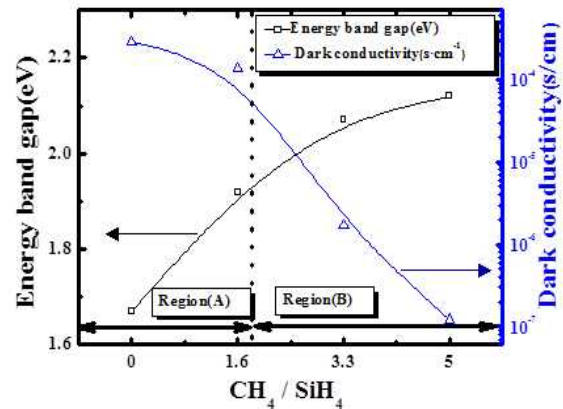


Fig. 1. Optical band gap and dark conductivity of single p-a-SiC:H layers as a function of [CH₄]/[SiH₄] gas ratio.

비정질 실리콘 막 내에서 카바이드의 양이 증가하면 순수한 비정질 실리콘 막 대비 밴드갭이 증가하게 되고 이에 따라서 전기전도도는 감소하게 된다. 이종접합 태양전지의 고효율화를 위해서는 p layer의 광 흡수가 최소화되고 흡수층 웨이퍼에서의 광흡수가 극대화되어야 한다. 카바이드 함량을 증가시켜서 이러한 목적을 달성할 수 있지만 전기적 특성 하락은 일반적으로 태양전지의 개방전압과 곡선인자 하락에 영향을 주게 된다. 또한 과도한 밴드갭은 밴드오프셋을 야기할 수 있다 [11]. 카바이드 함량 비율이 0~1.6까지 증가함에 따라 밴드갭 상승폭이 0.25 eV 증가하고 전도도는 1/2로 감소한다. 하지만 Region(A)에서 Region(B)로 넘어

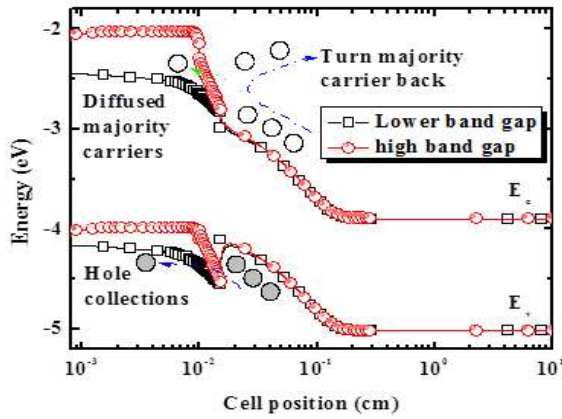


Fig. 2. Band-diagram schematic of cell along with cell position.

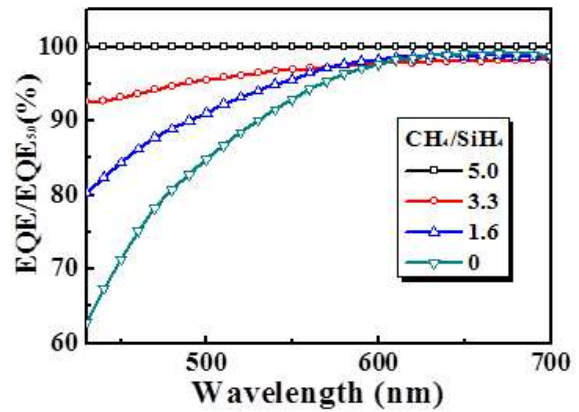


Fig. 4. The EQE of heterojunction solar cells with different $[CH_4]/[SiH_4]$ gas ratios.

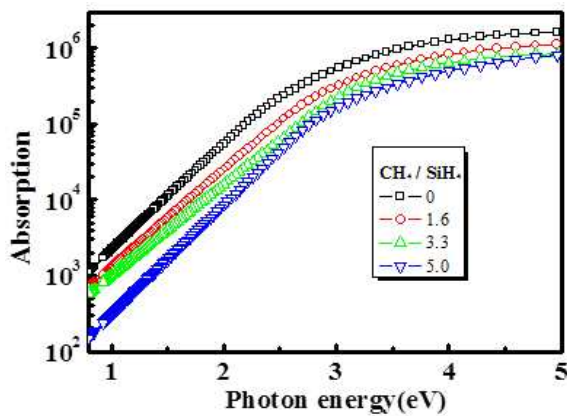


Fig. 3. The absorption coefficient of the p-a-SiC:H films with different $[CH_4]/[SiH_4]$ gas ratios.

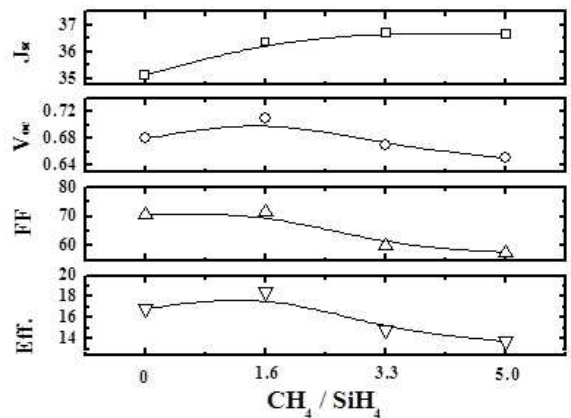


Fig. 5. The cell parameters as V_{oc} , J_{sc} , FF, and Eff of heterojunction solar cells as a function of various $[CH_4]/[SiH_4]$ gas ratios.

갈 때 밴드갭 상승폭은 0.15 eV 증가하나 전도도가 1/100으로 크게 감소하게 된다.

그림 2는 시뮬레이션을 통해 수광층의 밴드갭에 따라서 캐리어의 수집정도에 관하여 도식화 하고 있다. 그림 1에서 수광층에서 카바이드 함량이 증가함에 따라 밴드갭이 높아지게 되는데, 수광층의 밴드갭이 높아지게 되면 소자의 흡수층에서 생성할 수 있는 캐리어가 많아지게 되고 캐리어의 이동이 향상됨에 따라 소자의 광학적 특성이 향상된다.

그림 3은 카바이드 함량에 따른 흡수도 측정된 결과이다. 카바이드 함량에 따른 흡수도는 장파장 영역에서 흡수도가 $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 으로 매우 낮고 단파장 영역에서는 $5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ 으로 매우 높은 것은 결과를

얻을 수 있었으며, 이러한 결과는 수광층에서 장파장 영역의 흡수도는 소자에 끼칠 영향이 단파장에서 미치는 영향에 비해 크다고 판단된다. 카바이드 함량이 증가함에 따라 단파장 영역에서 흡수도가 4배 이상 차이가 발생하는 것으로 보아 단파장 흡수도에 큰 영향을 줄 것이다.

그림 4는 카바이드 함량 변화에 따라 단파장 영역에서 양자효율을 비교 분석하였다. 카바이드 함량 비율을 5에서 0으로 감소시켰을 때 카바이드 함량 비율이 5인 것을 양자효율이 100%로 기준으로 두었을 때 카바이드 함량이 감소될 때 카바이드 함량 비율이 0인 것과 비교하면 38%까지 감소하였다. 하지만 파장이 600 nm 이상 구간에서는 수광층의 낮은 흡수도로 인하여 큰 차이를 보이지 않았다. 소자에서 수광층의 단파장 영역

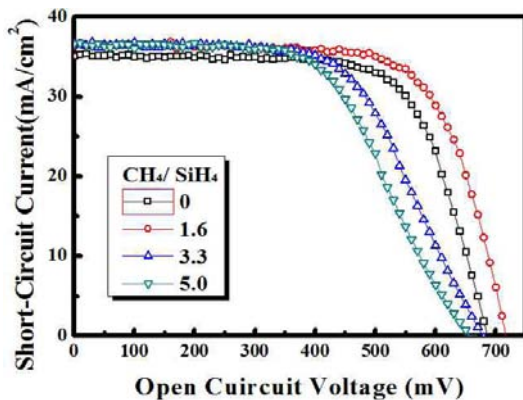


Fig. 6. The J-V curve characteristics of the heterojunction solar cell with various $[CH_4]/[SiH_4]$ gas ratios.

에서 흡수도의 큰 차이는 소자의 단파장 영역에서 큰 영향을 미쳤다.

그림 5는 이종접합 태양전지 수광층의 카바이드 함량 비율이 0에서 1.6까지 증가함에 따라 개방전압과 단락전류가 30 mV, 0.8 mA/cm² 증가하고 변환 효율은 1.59% 증가하였다. 그러나 카바이드 함량 비율이 1.6에서 5까지 증가함에 따라, 개방전압은 60 mV 감소하고 곡선인자는 14% 큰 폭으로 감소하여 변환효율이 4.67% 감소하게 되었다.

그림 6은 최종 이종접합 태양전지 J-V 특성 곡선이다. 카바이드 함량이 1.6에서 개방전압 710 mV 단락전류 36.35 mA/cm² 곡선인자 71.38%를 달성하였다.

4. 결론

카바이드 함량의 변화에 따라 소자의 광학적, 전기적 특성을 알아보았다. 카바이드 함량이 증가함에 따라 전도도의 감소와 밴드갭의 증가하는데 카바이드 함량 비율이 1.6 이상 증가할 경우 전도도의 1/100 이상의 감소와 밴드오프셋을 야기하기 때문에 소자에 있어서 개방전압이 60 mV 감소하게 되고, 곡선인자가 14% 감소하게 된다. 또한 카바이드 함량이 증가함에 따라 흡수도가 4배 이상 감소하게 되는데 이를 소자에 EQE 측정 결과 수광층의 단파장 영역에서 더 높은 양자효율을 성취할 수 있었다. 우리는 카바이드 함량 변화에 따라 소자의 개방전압, 단락전류, 곡선인자를 측정한 결과 최종적으로 개방전압 710 mV, 개방전압 710 mV 단락전류 36.35 mA/cm² 곡선인자 71.38%를 달성하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20153010012090)

REFERENCES

- [1] M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, *IEEE J. Photovolt.*, **4**, 96 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282737>]
- [2] Z. C. Holman, A. Descoedres, L. Barraud, F. Z. Fernandez, J. P. Seif, S. D. Wolf, and C. Ballif, *IEEE J. Photovolt.*, **2**, 7 (2012).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2174967>]
- [3] D. Zhang, D. Deligiannis, G. Papakonstantinou, R.A.C. M.M.V. Swaaij, and M. Zeman, *IEEE J. Photovolt.*, **4**, 1326 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2344768>]
- [4] H. Fujiwara, T. Kaneko, and M. Kondo, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 133508 (2007).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2790815>]
- [5] M.W.M. van Cleef, J. K. Rath, F. A. Rubinelli, C. H. M. van der Werf, R. E. I. Schropp, and W. F. van der Weg, *J. Appl. Phys.*, **82**, 6089 (1997).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.366479>]
- [6] K. Ding, U. Aeberhard, F. Finger, and U. Rau, *J. Appl. Phys.*, **113**, 134501 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4798603>]
- [7] Y. Hattori, D. Kruangam, T. Toyama, H. Okamoto, and Y. Hamakawa, *Appl. Surf. Sci.*, **33**, 1276 (1988).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-4332\(88\)90445-X](http://dx.doi.org/10.1016/0169-4332(88)90445-X)]
- [8] Y. Tawada, M. Kondo, H. Okamoto, and Y. Hamakawa, *Sol. Energy Mater.*, **6**, 299 (1982).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633\(82\)90036-3](http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633(82)90036-3)]
- [9] H. Tarui, T. Matsuyama, S. Okamoto, H. Dohjoh, Y. Hishikawa, N. Nakamura, S. Tsuda, S. Nakano, M. Ohnishi, and Y. Kuwano, *J. Appl. Phys.*, **12**, 2436 (1989).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.28.2436>]
- [10] I.F.S. Ionentechnik and F. Jülich, *J. Non-Cryst. Solids*, **266**, 845 (2000).
- [11] C. L. Zhong, L. E. Luo, H. S. Tan, and K. W. Geng, *Sol. Energy Mater.*, **108**, 570 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.010>]