

## 광학 시뮬레이션을 이용한 향상된 효율의 “Heterojunction with Intrinsic Thin layer(HIT)” 태양전지 구조 설계

송진욱, 이현우, 유승협\*

한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 대전 유성구 구성동 305-701

E-mail: syoo@ee.kaist.ac.kr

태양전지의 시장 경쟁력을 위해선 발전단가가 낮아야 하기 때문에, 현재까지도 더 높은 효율의 태양전지가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 더 높은 효율의 태양전지를 설계하기 위하여 광학적인 시뮬레이션을 이용하여 HIT 태양전지 구조에서 흡수가 큰 태양전지의 구조를 예측하였고, 이러한 구조에 대해서 EDISON 나노물리에서 지원하는 “태양전지 해석용 SW”를 사용하여 효율을 계산하였다. 소프트웨어를 통한 계산 결과 태양전지에 의한 흡수가 클수록 이는 직접적으로 전류밀도의 향상으로 나타났고, 따라서 효율이 증가하였다. 이러한 광학적인 예측을 통하여  $105.8 \text{ W/m}^2$ 의 효율을 가지는 태양전지를 디자인 함으로써, 기존 HIT 태양전지의 효율인  $56.62 \text{ W/m}^2$  보다 약 1.868배 향상된 태양전지를 구현하였다.

### INTRODUCTION

에너지 수요와 더불어 친환경적인 에너지 발전에 대한 요구 또한 증가하고 있기 때문에, 신, 재생에너지에 대한 중요성과 연구, 투자가 점점 커지고 있다. 이러한 신, 재생에너지들 중에서 태양광 발전이 발전 장소에 상대적으로 크게 구매 받지 않는 동시에 따로 연료가 필요하지 않는 등의 여러 장점들을 가지고 있기 때문에 오래 전부터 연구 및 발전 되고 있고, 시장 또한 빠르게 증가하고 있다. 이러한 태양전지들 중 가장 먼저 개발된 태양전지인 단결정 Silicon(Si) 태양전지는 박막 혹은 다결정 태양전지에 비해 변환효율이 높다는 장점이 있지만 고온 공정( $\sim 1000^\circ\text{C}$ )이 필요하기 때문에 단가가 비싸다는 단점이 있다. 하지만 “Heterojunction with Intrinsic Thin layer(HIT)” 구조를 사용한 태양전지의 경우  $200^\circ\text{C}$  부근의 저온 공정을 통해 제작이 가능한 동시에 높은 효율을 포함하여 다양한 장점들을 가지고 있기 때문에[1] 현재 상용화 되어 있고, 아직까지도 HIT 태양전지에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다[2],[3].

하지만 기존의 발전방식을 충분히 대체하기에는 현재까지도 발전 단가가 충분히 낮지 못한 상황이기 때문에, 시장 규모가 커지기 위해서는 발전단가를 낮추는 것이 중요한 이슈라고 할 수 있다. 그 중 태양전지의 효율을 높이는 것이 발전 단가를 낮추는 핵심적인 방법들 중 한가지이다. 따라서 본 연구에서는 광학적인 시뮬레이션을 사용하여 기존의 HIT 태양전지의 구조보다 더 높은 효율을 가지는 구조를 예측함으로써 고효율 태양전지의 가능성을 확인하고, 동시에 EDISON 나노물리에서 지원하는 “태양전지 해석용 SW”를 사용하여 이를 확인 및 분석 하고자 한다.

### CALCULATION METHODS

태양전지의 효율을 향상시키는 방법에는 tandem 구조를 만드는 방법이나 혹은 Fill Factor 값을 증가시키는 방법 등의 다양한 방법이 존재한다. 하지만 EDISON 나노물리에서 지원하는 “태양전지 해석용 SW”에서는 시뮬레이션할 수 있는 물질들이 crystalline(c-Si), microcrystalline ( $\mu\text{c-Si}$ ), amorphous silicon(a-Si)로 정해져 있다. 그러므로, 빛이 태양전지에서 흡수되는 양을 증가 시킴으로

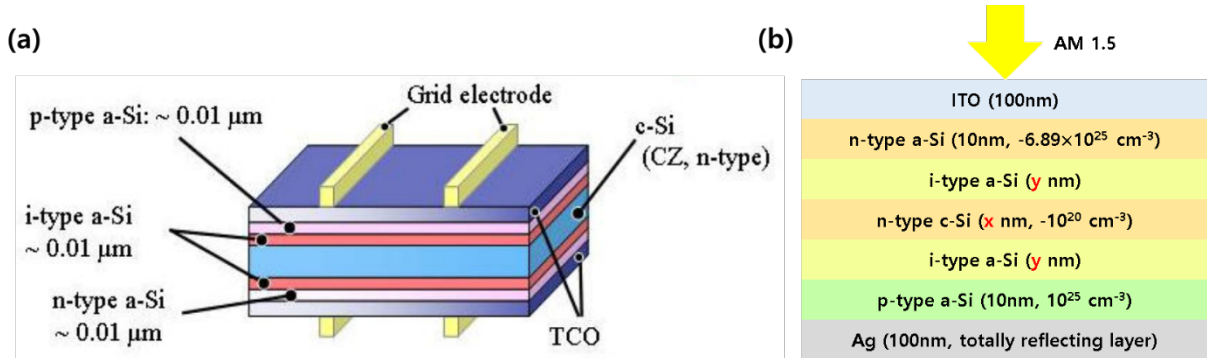


Fig. 47. (a) Sanyo 사의 HIT Solar Cell 의 구조 (Source: 경진대회 자료, [6]) (b) 시뮬레이션에 사용된 태양전지의 구조

써 short circuit current density( $J_{sc}$ )의 값을 증가시키고 이를 통하여 태양전지의 효율을 높이는 방법이 합리적인 방법들 중 하나라고 할 수 있다.

흡수율을 직접적으로 구하기는 쉽지 않다. 하지만, 일반적으로 어떤 시스템에 들어가는 빛은 투과(Transmittance)되거나, 반사(Reflectance)되거나 혹은 흡수(Absorbance) 되어야만 하기 때문에,

$$T(\text{투과율}) + R(\text{반사율}) + A(\text{흡수율}) = 1$$

이란 식이 성립하게 된다. 더불어 “태양전지 해석용 SW”의 시스템에서도 그러하듯이, 일반적으로 태양전지에서 빛이 입사하는 면의 반대편에는 반사판이 부착되어 있고, 따라서  $T=0$ 이다. 즉,  $A=1-R$  이기 태양전지의 반사율을 구할 수 있다면 흡수율을 쉽게 얻을 수 있다.

중요한 점은, “태양전지 해석용 SW”의 경우 다층 박막 구조를 가정하고 있기 때문에 이러한 반사율을 기존에 광학에서 매우 잘 알려진 Transfer-matrix formalism을 통해 계산함으로써 광학적으로 예측이 가능하다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 잘 알려진 방법[4],[5]을 통하여 Transfer-matrix formalism 시뮬레이션을 구현한 후에 흡수율을 광학적으로 예측하였다. 여기서 [5]에서는 빛이 lossless medium으로 투과되지만 “태양전지 해

석용 SW”에서는 빛이 반사판에서 완전 반사됨을 가정하고 있기 때문에, 이에 맞게 기존의 수식을 조금 수정하여 시뮬레이션을 구현하였다.

시뮬레이션에 사용된 구조로는 경진대회 문제에도 제시되어 있으며, 높은 효율을 가지는 동시에 이미 상용화 되어있는 Sanyo사의 HIT solar cell과 유사한 구조를 사용하였다(Fig. 1.). 그 이유는 이미 상용화된 높은 효율을 가지는 태양전지와 같은 유사한 구조를 가지면서 효율이 더 높은 태양전지를 얻을 수 있다면, 기존의 기반시설들과 공정을 그대로 가져갈 수 있고, 따라서 투자 비용 없이 바로 더 높은 효율의 태양전지를 얻을 수 있다는 점에서 매우 큰 의미가 있기 때문이다.

아래와 같은 구조에서 광학적으로 다른 층(굴절률 값이 서로 다른 층)들인 a-Si, c-Si의 두께를 변화시켜가면서 빛의 파장에 따른 흡수를 계산하였다. 여기서 n-type a-Si와 i-type a-Si는 같은 굴절률을 가지기 때문에 광학적으로 같은 층이라고 생각할 수 있고 있고 따라서 i-type a-Si층의 두께만을 고려하였다. 또한, 시뮬레이션 결과 상으로 c-Si층을 기준으로 위쪽에 있는 a-Si층의 두께만 증가할 때와, 아래쪽에 있는 a-Si층의 두께만 증가할 때 둘 다 a-Si층의 두께가 두꺼워 질수록 태양전지에 의한 흡수가 증가함을 알 수 있었다.

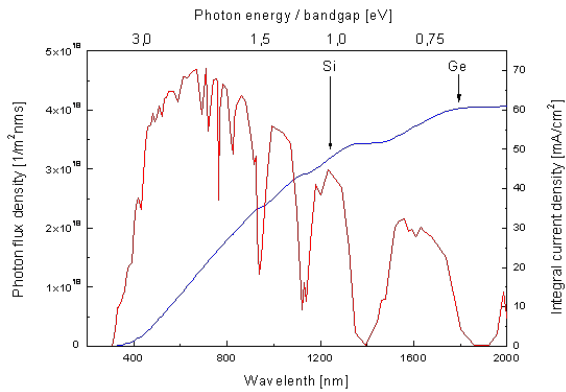


Fig. 2. AM 1.5 조건에서의 파장에 따른 photon flux (Source: <http://www.superstrate.net/pv/limit/>)

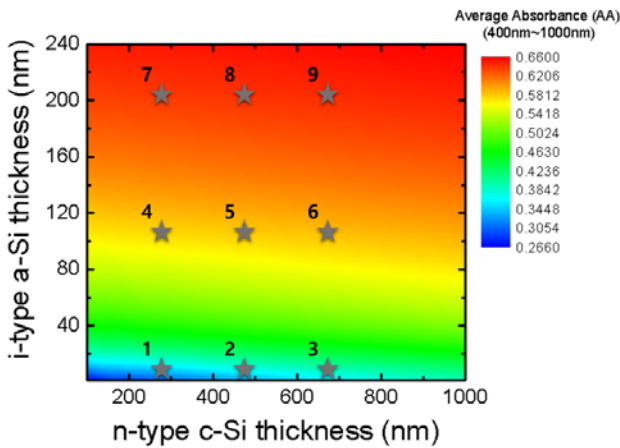


Fig. 3. c-Si 층의 두께와 a-Si 층의 두께에 따른 평균 흡수율

따라서 시뮬레이션 결과를 시각적으로 좀더 이해하기 용이하도록 하기 위하여 c-Si층을 기준으로 위아래에 있는 a-Si층들의 두께를 동일하게 변화시켰다.

여기서, 광학 시뮬레이션에 필요한 n, k 값은 문헌들을 통하여 알려진 값들[7],[8],[9]을 사용하였다. 또한 빛의 흡수에 의한  $J_{sc}$ 는 빛의 세기가 아닌 photon flux에 의하여 결정 되는데, 이러한 photon flux는 “태양전지 해석용 SW”에서 사용되는 AM 1.5 조건과 Si의 밴드갭에 의한 제한을 고려하면 400nm ~ 1000nm 파장에서의 빛의 흡수에 의해

Data Number	x (c-Si thickness)	y (a-Si thickness)	Average Absorbance(AA)
1	274	3	0.3134
2	474	3	0.3410
3	674	3	0.3655
4	274	103	0.5719
5	474	103	0.5771
6	674	103	0.5824
7	274	203	0.6369
8	474	203	0.6400
9	674	203	0.6428

Table 18. 각 data point 에서 사용된 두께 및 평균 흡수율

태양전지의 효율이 거의 결정된다. 그런데, 이러한 400nm ~ 1000nm 파장에서의 photon flux가 파장에 따라 거의 비슷한 값을 가지기 때문에(Fig. 2.), photon flux에 따른 weighting factor를 고려하지 않고, 400nm ~ 1000nm 파장에서의 흡수를 평균 낸 값을 태양전지에 의한 흡수율로 보고 분석하였다.

## RESULTS AND DISCUSSION

광학적인 시뮬레이션 결과, c-Si층의 두께와 a-Si층의 두께 각각이 두꺼워 질수록 태양전지에 의한 흡수가 증가한다. 하지만 c-Si층의 두께가 증가함에 따라서는 흡수율이 크게 증가하지 않았으나, a-Si층의 두께가 증가함에 따라서는 흡수율이 크게 증가하였다. 이러한 결과를 “태양전지 해석용 SW”에서의 결과와 비교 분석하기 위하여 Figure 3에 나타낸 9개의 data point들에 대해서 “태양전지 해석용 SW”를 통한 시뮬레이션을 수행하였다(Fig. 3.). 각 data point들에 대한 정보는 Table 1.에 정리 되어 있다.

각 data point들에 대해 “태양전지 해석용 SW” 시뮬레이션을 수행한 결과들의 J-V 그래프로부터 흡수가  $J_{sc}$ 의 값에 크게 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. J-V 그래프를 보면, 광학적인 시뮬레

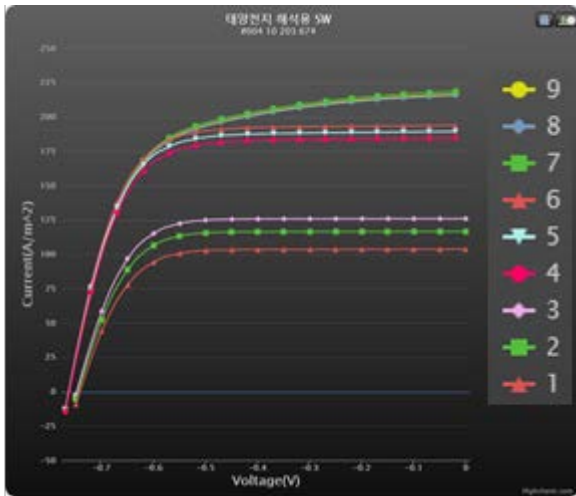


Fig. 4. "태양전지 해석용 SW"를 이용하여 얻어진 각 data point에서의 J-V 그래프

이선으로 얻어지는 흡수율의 경향성과, J-V 그래프에서의 전류밀도(J)의 경향성이 거의 일치하고 있기 때문이다(Fig. 4). 다시 말해, 광학적 시뮬레이션으로 얻어지는 흡수가 높을수록 전류밀도 값이 증가하고 있으며, 이는 흡수가 높아짐에 따라 전류밀도 값이 증가할 것이라는 예상과 정확히 일치한다. 전류밀도 값이 흡수에 절대적으로 영향을 받는다는 것은 각 data point에서의 흡수율의 상대적 비율과  $J_{sc}$ 의 상대적 비율들이 매우 유사한 값들을 가진다는 점에서 매우 명확하다(Table 2.).

하지만 data 7, 8, 9에서 나타난 결과에서 볼 수 있듯이 흡수율의 경향성과 전류밀도의 경향성이 완벽히 일치하지는 않는데, 이는 현재로서는 (1) AM1.5 photon flux를 고려한 흡수율이 고려되지 못하였고, (2) 흡수 가능한 모든 파장에서 시뮬레이션을 수행하지 못해서 생긴 오차일 수도 있을 것이라고 생각된다. 따라서, 이는 차후에 AM1.5 photon flux를 고려하여 흡수율에 weighting factor를 주고 흡수 가능한 모든 파장에서 시뮬레이션을

Data Number	AA	Relative AA	$J_{sc}$	Relative $J_{sc}$
1	0.3134	1	103.7	1
2	0.3410	1.088	116.6	1.124
3	0.3655	1.166	126.0	1.214
4	0.5719	1.824	185.1	1.784
5	0.5771	1.841	189.5	1.827
6	0.5824	1.858	193.9	1.869
7	0.6369	2.032	220.2	2.123
8	0.6400	2.042	217.3	2.094
9	0.6428	2.051	217.9	2.100

Table 19. 각 data point에서의 흡수, 흡수율의 비율,  $J_{sc}$  및  $J_{sc}$ 의 비율

한다면 좀더 정확한 판단을 내릴 수 있을 것이다.

Generation rate 그래프 또한  $J_{sc}$ 의 증가가 흡수의 증가에 의한 것이라는 뒷받침해준다. 전체 두께가 같은 3개의 구조(data 3, 5, 7)의 Generation rate를 보면, a-Si 층에서 c-Si층보다 훨씬 많은 charge들이 생성되고 있음을 확인할 수 있다(Figure 5). 그런데 그래프의 y축 scale이 log scale이므로 이는 전체 Generation rate를 생각하면 a-Si층의 두께가 더 두꺼운 data 7 구조에서 생성된 전하의 총량이 제일 많음을 알 수 있고 이는 Figure 4에서 전류밀도의 증가로 확인되었다. 이러한 결과는 Figure 3에서 나타나는 c-Si보다도 a-Si의 두께가 두꺼울수록 흡수가 높다는 결과와 정확히 일치하고, 그러므로 전류밀도의 값은 흡수에 의해 지배적으로 영향을 받음을 확인할 수 있다.

따라서 "태양전지 해석용 SW"를 이용하여 태양전지에 빛이 흡수되는 양이  $J_{sc}$ 에 바로 직결됨을 확인하였다. 그러므로 높은 효율의 태양전지를 위해선 앞에서도 언급하였듯이 높은  $J_{sc}$ , 즉, 높은 흡수율을 가지는 구조를 광학 시뮬레이션을 통하여 설계가 가능하다. 하지만, Figure 4에서 볼 수 있듯이 일정 흡수율 이상에서는  $J_{sc}$ 가 증가하더라

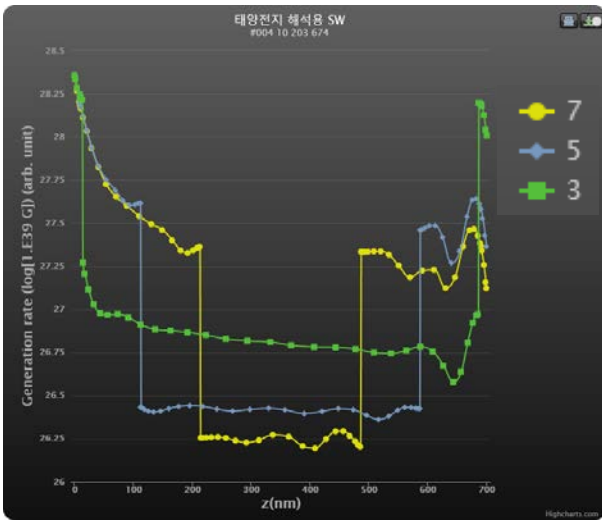


Fig. 5. “태양전지 해석용 SW”를 이용하여 얻어진 data 3, 5, 7 에서의 Generation rate

도 Fill Factor가 감소하게 되어, maximum Power는 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 흡수율의 증가를 통해  $J_{sc}$ 는 계속 증가할 수 있지만 maximum power는 거의 포화 되었다는 점을 생각하면, 효율 면에서 현재 구조와 현재 방법으로 구할 수 있는 거의 최대 효율을 구했다고 판단된다. 9개의 data point에서 가장 좋은 maximum power는 data 7 에서  $J=179.55 \text{ A/m}^2$ ,  $V=-0.589 \text{ V}$ 으로  $105.8 \text{ W/m}^2$  으로, 이는 초기의 HIT solar cell 구조(data 1)의 효율인  $J=96.13 \text{ A/m}^2$ ,  $V=-0.589 \text{ V}$ 으로  $56.62 \text{ W/m}^2$  보다 약 1.868배 향상된 효율을 나타낸다.

#### CONCLUSION(또는 결론)

광학적인 시뮬레이션에서 나타난 경향성을 바탕으로 몇몇 data point들에 대해 EDISON 나노물리에서 지원하는 “태양전지 해석용 SW”시뮬레이션을 수행한 결과, 초기의 예측대로 전류밀도의 값은 흡수에 의해 지배적으로 영향을 받음을 확인 할 수 있었다. 이러한 사실을 바탕으로 광학적인 시뮬레

이션을 사용하여 기존의 HIT solar cell 구조를 그대로 이용하면서 흡수율이 높은 구조를 설계함으로써 효율이 기존의  $56.62 \text{ W/m}^2$  에서  $105.8 \text{ W/m}^2$  로 약 1.868배 향상된 태양전지를 구현할 수 있었다.

위의 방법은 기존의 HIT solar cell과 같은 구조를 사용하기 때문에 기존의 기반시설들과 공정을 그대로 가져가면서도 더 높은 효율의 태양전지를 얻을 수 있다는 점에서 매우 큰 의미가 있다. 더불어, HIT solar cell뿐만 아니라 Si 다층 박막 구조를 가지는 어떠한 유형의 태양전지에도 “태양전지 해석용 SW”와 광학적인 시뮬레이션을 수행할 수 있기 때문에, 둘을 잘 결합시킨다면 좋은 결과들을 낼 수 있을 것이라 사료된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT(또는 감사의 글)

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2012-M3C1A6035302)

#### REFERENCES(또는 참고문헌)

- [1] Tanaka, Makoto, Mikio Taguchi, and Takao Matsuyama. "Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer." *Jpn. J. Appl. Phys* 31 (1992): 3518-3522.
- [2] Taguchi, Mikio, et al. "24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer." *Photovoltaics, IEEE Journal of* 4.1 (2014): 96-99.
- [3] Ghannam, Moustafa, et al. "On the possible role of the interfacial inversion layer in the improvement of the performance of hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells

- [HIT]." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 132 (2015): 320-328. (from <http://refractiveindex.info/?shelf=other&book=In2O3-SnO2&page=Konig>)
- [4] Born, Max, and Emil Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge university press, 1999.
- [5] Troparevsky, M. Claudia, et al. "Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: from coherent to incoherent interference." *Optics express* 18.24 (2010): 24715-24721.
- [6] Mishima, Takahiro, et al. "Development status of high-efficiency HIT solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95.1 (2011): 18-21.
- [7] Nguyen, Hieu T., et al. "Temperature dependence of the band-band absorption coefficient in crystalline silicon from photoluminescence." *Journal of Applied Physics* 115.4 (2014): 043710. (From <http://www.pvlighthouse.com.au/resources/photovoltaic%20materials/refractive%20index/refractive%20index.aspx> )
- [8] Palik, Edward D., ed. *Handbook of optical constants of solids*. Vol. 3. Academic press, 1998. (from <http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Si&page=Pierce>)
- [9] Konig, Tobias AF, et al. "Electrically Tunable Plasmonic Behavior of Nanocube-Polymer Nanomaterials Induced by a Redox-Active Electrochromic Polymer." *ACS nano* 8.6 (2014): 6182-6192.