

# Emitter Electrode Design to Optimize the Optical and Electrical Characteristics of Planar Solar Cells

Sangbok Lee and Yun Seon Do<sup>†</sup>

*School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea*

(Received November 19, 2019; Revised January 7, 2020; Accepted January 7, 2020)

In this study, we propose a design method to optimize the electro-optical efficiency of a planar solar cell structure by adjusting one-dimensionally periodic emitter electrodes. Since the aperture ratio of the active layer decreases as the period of the emitter electrode decreases, the amount of light absorption diminishes, affecting the performance of the device. Here we design the optimal structure of the periodic emitter electrode in a simple planar solar cell, by simulation. In terms of optics, we find the condition that shows optical performance similar to that of a reference without the emitter electrode. In addition, the optimized electrode structure is extracted considering both the optical and electrical efficiency. This work will help to increase the utilization of solar cells by suggesting a structure that can most efficiently transfer charge generated by photoelectric conversion to the electrodes.

Keywords: Solar cell, Planar solar cell, Emitter electrode, Optical properties, Electrical properties  
OCIS codes: (250.0250) Optoelectronics; (350.3950) Micro-optics; (350.6050) Solar energy

## 평판형 태양 전지의 광학 및 전기적 특성 최적화를 위한 에미터 전극 설계 연구

이상복 · 도운선<sup>†</sup>

경북대학교 IT대학 전자공학부  
Ⓣ 41566 대구광역시 북구 대학로 80

(2019년 11월 19일 받음, 2020년 1월 7일 수정본 받음, 2020년 1월 7일 게재 확정)

본 연구에서는 기본적인 평판 태양 전지 구조에 1차원 주기를 가지는 에미터 전극 배치를 통해 광학 및 전기적 효율을 최적화하는 설계방법을 제안한다. 에미터 전극의 주기가 줄어들면 에퍼치 비율이 감소해 빛 흡수율이 줄어들어 태양 전지 성능 저하에 영향을 끼친다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 가장 간단한 평판형 태양 전지 구조 내에서 에미터 전극 배열의 최적안을 제시하였다. 광학적 측면에서 에미터 전극이 없이 광흡수층 전면에서의 광흡수를 하는 레퍼런스 소자와 성능이 유사한 조건을 도출했다. 그리고 광흡수 및 전기적 효율 측면을 모두 고려하여 가장 효과적인 전극 구조를 제안하였다. 본 연구 결과는 광전 변환으로 생성된 전하를 전극으로 가장 효율적으로 전달할 수 있는 구조를 제안함으로써, 대체 에너지원에서 큰 비중을 차지하고 있는 태양 전지의 활용성을 높이는 데 기여할 것이다.

Keywords: 태양 전지, 평판형 태양전지, 에미터 전극, 광학적 특성, 전기적 특성  
OCIS codes: (250.0250) Optoelectronics; (350.3950) Micro-optics; (350.6050) Solar energy

### I. 서 론

산업혁명 이후 가장 많이 사용되고 있는 에너지인 화석연료를 통해 생활의 편의를 얻었지만, 주 연료인 석유는 약 40년, 석탄은 약 220년, 가스는 약 60년 후에 고갈될 것이라 예상된다<sup>1)</sup>. 또한 화석연료의 연소 배출물은 미세먼지를 포함한 대기 오염을 일으키고 지구 온난화를 가속하는 주 원인이

기도 하다. 이러한 화석 에너지의 고갈에 대비하고 지구 환경을 보존하기 위해 신 재생 에너지에 대한 기술적 요구가 증가하고 있으며, 이 중 수력, 지열, 풍력, 조력, 태양열과 같이 탄소를 배출하지 않는 대체 에너지원 중 태양 에너지는 공해를 일으키지 않으면서 무한대의 자원으로 사용이 가능하며 그 발전성이 기대되고 있다<sup>2)</sup>. 태양 에너지는 여러 가지 형태의 에너지로 변환되어 에너지원으로 사용이 가능한데,

<sup>†</sup>E-mail: [yuns.do@knu.ac.kr](mailto:yuns.do@knu.ac.kr), ORCID: 0000-0002-0715-8033

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

먼저 광자를 흡수하여 열 에너지로 변환시키는 것<sup>[3]</sup>, 광 촉매제로 쓸 수 있는 화학 연료를 생산하는 것<sup>[4]</sup>, 그리고 가장 대표적인 방법인 광자를 이용해 직접적으로 전자를 만드는 방법<sup>[5,6]</sup>이 있다. 이러한 대표적인 방법을 활용하기 위해서 태양 전지가 필요하다.

태양 전지는 재료에 따라 구분되는데, 실리콘과 같은 무기 반도체를 사용한 무기 태양 전지(inorganic compound solar cell)<sup>[7]</sup>와 메로시아닌 등의 유기 염료를 사용한 유기 태양 전지(organic solar cell)<sup>[8]</sup>로 구분할 수 있다. 대표적으로 메로시아닌, 프탈로시아닌, 필리룸과 클로로필 등을 기반으로 제작된 유기 태양 전지들이 연구되고 있다<sup>[9-12]</sup>. 유기 태양 전지는 값싼 유기물을 사용하고 대면적화가 가능해 높은 생산성을 기대할 수 있지만, 소자의 신뢰성과 광변환 효율이 매우 낮아 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 도너(donor) 및 억셉터(acceptor) 층의 재료를 통해 HOMO (highest occupied molecular orbit), LUMO (lowest occupied molecular orbit)를 조절하여 효율을 높이거나<sup>[13]</sup>, 표면 모폴로지(morphology)를 제어하여 화학적 혹은 광학적 효과를 통해 효율을 높이는 등 다양한 시도를 통해 현재 약 6~12% 정도의 효율이 보고되고 있다<sup>[14-16]</sup>.

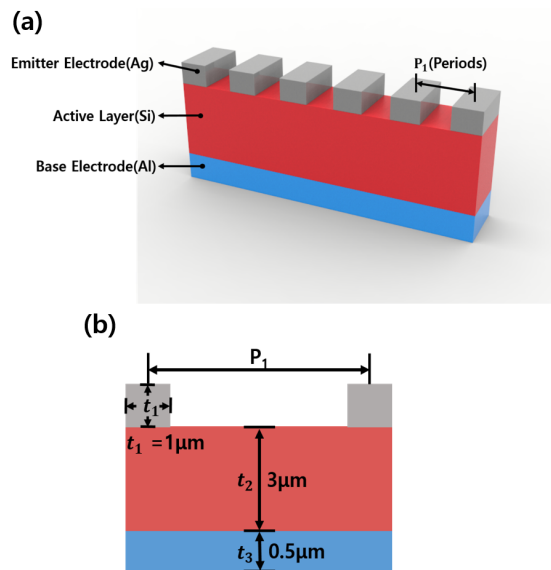
반면, 무기 태양 전지는 유기 태양 전지 대비 우수한 효율과 높은 생산성으로 현재 태양 전지 시장의 대부분을 차지하고 있다. 특히 기판형 결정질 실리콘(Si) 태양 전지는 신뢰성, 수명, 효율 측면에서 우수하며 태양 전지 시장 중 주택 및 소규모 발전용으로 적합해 태양 전지 산업의 80% 이상의 시장점유율을 차지하고 있다. 결정질 Si 태양 전지는 이론적으로 약 29%의 최고 광전효율<sup>[17]</sup>을 달성할 수 있으며, 저가화와 생산 수율 등을 고려한 양산단계의 태양 전지도 19~21%의 효율을 달성하고 있다<sup>[18-20]</sup>. 하지만, Si 태양 전지는 원재료인 Si과 공정 비용이 높아 단가를 낮추기가 어려운 단점이 있다.

태양광 에너지 발전의 비용 절감을 위해 Si 원재료의 저가화, 박막형 기판 사용, 태양 전지의 효율성 증가 등 다양한 연구가 진행 중이다. 태양 전지의 효율을 증가시키기 위해서는 광 흡수층의 높은 흡수율, electron-hole pair (EHP)의 생성 비율의 최대화, EHP의 분리를 위한 p-n 접합 전위차 등 광전 혹은 전기적 메커니즘에 따른 접근을 해볼 수 있고, 이러한 기본 메커니즘을 극대화할 수 있도록 다양한 나노 및 마이크로 구조에서 일어나는 광학 공진 현상을 응용하는 사례가 많이 연구가 되어 오고 있다. 본 논문에서는 만들어진 전자(electron)와 정공(hole)을 최종적으로 외부로 많이 이끌어낼 수 있는 관점에서 태양 전지의 효율을 최적화하는 연구를 진행하였다. 상부 contact 전극(주로 emitter 전극)의 형태에 따라 태양전지의 최종 성능을 보고한 연구들이 있으나<sup>[21,22]</sup>, 전극의 크기가 크며 그 모양에 따른 전하의 분포특성과 전기장의 세기 등 전기적인 관점에서 연구가 되어왔다. 본 논문에서는 이러한 전기적 특성과 더불어 광학적 효과를 동시에 검토하여 최적 안을 설계하기 위해 마이크로 패턴을 이용하여 광학적 효과와 전기적 특성과의 관계를 규명하고

자 한다. 본 논문에서 우리는 광 흡수 및 광전 활성화 층(active layer)과 양극, 음극으로 이루어진 가장 기본적인 평면 구조의 태양 전지 구조에서 에미터 전극의 주기를 조절하여, 기존 태양 전지의 태양광 흡수율을 비슷하게 유지하면서 전기적 특성을 개선할 수 있는 태양 전지의 전극의 최적 디자인을 제안한다. 광전 변환으로 생성된 전하를 가장 효율적으로 전극으로 전달할 수 있는 구조를 제안함으로써, 양산에 적합한 단순한 구조와 공정, 저비용을 고려한 효율 개선에 적합한 방안을 제시할 수 있을 것이다. 이를 통해 대체 에너지원에서 큰 비중을 차지하고 있는 태양 전지의 활용성이 높아질 것을 예상된다.

## II. 연구 방법

그림 1(a)는 기본적인 평면 무기 태양 전지를 도식화한 것이다. 이 구조는 상부의 은(Ag) 에미터 전극, 실리콘(Si) 활성화 층, 하부의 알루미늄(Al) 베이스 전극으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 태양 전지를 설계할 때, 고려된 설계 변수를 나타낸다. 설계 변수는 전극 배열의 주기( $P_1$ )이다. 에미터 전극의 사이드는 두께( $t_1$ )가 1  $\mu\text{m}$ 인 정방형, 활성화 층의 두께( $t_2$ )는 3  $\mu\text{m}$ , 베이스 전극의 두께( $t_3$ )는 500 nm로 설정했다. 본 연구에서는 기본적인 평판형 태양 전지에서 상부 금속 에미터 전극의 주기에 따른 광학적 특성 변화를 측정하기 위해 2차원 FDTD (finite-difference time-domain) 방법(FDTD Solutions, Lumerical Inc. Canada)을 이용하였다. 하나의 단위 구조가 주기적으로 반복된다는 가정 하에 그 주기성을 이



**Fig. 1.** (a) Schematic design of the planar solar cell consisting of silver (Ag) emitter electrodes, a silicon (Si) active layer and an aluminum (Al) base electrode. (b) Design parameters of the unit solar cell; the period ( $P_1$ ) of the Ag emitter electrodes, the thickness ( $t_1$ ) and length of Ag emitter electrodes, the thickness ( $t_2$ ) of Si active layer, and the thickness ( $t_3$ ) of Al base electrode.

용하여 계산을 진행했다. 이를 위해 계산 범위의 경계 조건은 x축을 따라 Periodic, y축을 따라 PML (perfectly matched layer) 조건을 적용하였다. 300 nm에서 1300 nm 파장 대역을 가지는 평면파 광원을 사용하여 기판에서 y방향을 따라 단위 셀로 입사시켰다. 광 흡수율은 태양 전지의 활성화 층에서 계산하였다. 굴절률은 Si와 Al에 대한 Palik<sup>[23]</sup>의 데이터를 사용하였고, Ag에 대한 CRC<sup>[24]</sup>의 데이터를 사용하였다.

그림 2는 에미터 전극 배열의 주기( $P_1$ )의 변화에 따른 태양 전지의 빛 흡수율 특성의 변화를 나타낸다. 그림 2(a)는 에미터 전극의 주기에 따른 광 흡수율을 계산한 스펙트럼 결과이다. 에미터 전극으로 가리지 않고 활성층 전체 면적에서 광을 흡수하는 경우를 ‘No Emitter Electrodes’로 구분하였고 이를 레퍼런스로 하여 광흡수 성능을 비교하였다. 태양 전지의 평면 방향(x축 방향)으로는 Periodic으로 무한히 넓은 영역으로 설정하였다. 실제 구현되는 소자의 크기는 수 cm~수 m로 그 크기가 제한이 되지만, 가시광 및 적외선 대역의 빛의 파장의 크기와 수직 방향(y축 방향)으로 수  $\mu\text{m}$  급 박막의 치수를 고려할 때 무한하다고 가정할 수 있다. 다음으로 비교군이 주기적인 에미터 전극이 배치된 태양 전지의 경우, 전극의 주기를 20  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 계산하였다.

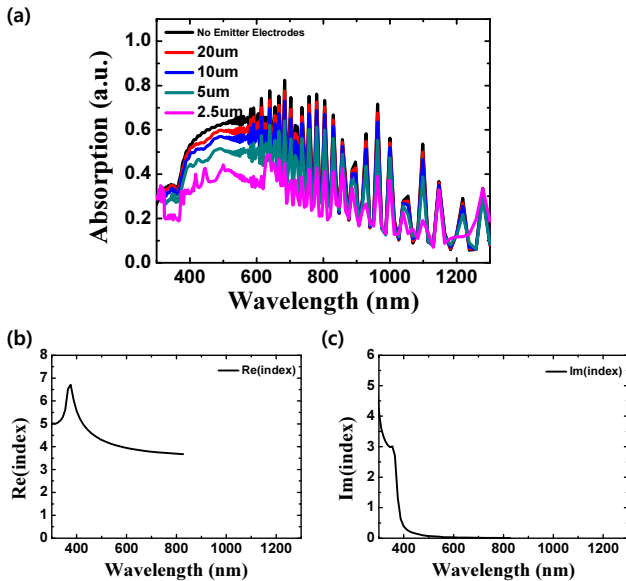
각 주기에 따른 광 흡수율은 300 nm에서 600 nm 사이의 단파장 영역에서는 파장이 커짐에 따라 증가하였고, 600 nm 이상의 장파장 영역에서는 잡음과 같은 리플(ripple)이 발생하면서 감소하는 경향을 보였다. 주기의 변화에 따른 광 흡수율의 변화가 뚜렷하게 보이는 단파장 영역 중 광 흡수율이 최댓값을 갖는 500 nm 파장의 데이터를 검토했다. 레퍼런스

의 경우 500 nm 파장에서의 광 흡수율은 약 0.61, 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때 약 0.59, 10  $\mu\text{m}$ 일 때 약 0.57, 5  $\mu\text{m}$ 일 때 약 0.51, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 약 0.42가 나왔다. 레퍼런스 소자 대비 전극의 주기가 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 광 흡수율이 약 31% 감소하였고, 이것은 에미터 전극의 주기가 감소할수록 광의 흡수량이 감소하는 것을 의미한다.

그림 2(b)와 2(c)는 광 흡수층인 Si의 굴절률의 실수 및 허수 값이다. 파장에 따라 그 값이 다르게 분포되어있다. 600 nm 이상의 장파장 대역에서 보이는 ripple 현상은 광활성층 내의 Fabry-Perot 효과로 해석할 수 있다. 유전물질인 Si의 아래쪽은 반사율이 높은 Al 평면이고, 위쪽은 Si보다 굴절률이 낮은 공기층과 경계가 형성되어 반사계수가 커 Si 내부에서의 다수 반사모드가 발생할 수 있다. 이러한 반사모드가 서로 보강, 상쇄 간섭이 될 수 있는 조건이 파장에 의존성이 있어 스펙트럼이 sinusoidal 형태로 나타난다. 광 활성층의 두께가 3  $\mu\text{m}$ 이고 600 nm 부근에서 Si의 굴절률의 실수부가 약 3.7 정도로 나타남을 고려하면 가시광 영역 내에는 Fabry-Perot 효과에 의한 고차 모드가 발생하고 ripple의 간격이 그림 2(a)와 같이 좁게 나타나게 될 것이다. 그리고 500 nm 이하의 파장영역에서는 굴절률의 허수부가 0보다 크고 실수부와 비교하여 유의미한 수준의 값을 나타내고 있어 이 파장영역에서의 광의 세기가 감쇠될 수 있고 이러한 현상이 ripple을 감쇠시킬 수 있다.

태양 전지의 광전 변환 동작은 태양광 전체 대역을 흡수하여 반응이 이뤄진다. 전체적으로 에미터 주기의 감소에 따라 흡수가 감소하는 경향이 있고, 그 대푯값으로 500 nm 파장의 광 흡수율을 비교했지만, 소자에서의 전체 흡수율 또한 검토되어야 한다. 전 파장 영역에서의 광 흡수율에 대한 평균값을 계산하여 전극의 주기에 따른 경향을 그림 3(a)에 나타냈다. 레퍼런스 소자의 광 흡수율의 평균값은 약 0.461, 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때는 약 0.441, 10  $\mu\text{m}$ 일 때는 약 0.420, 5  $\mu\text{m}$ 일 때는 약 0.380, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때는 약 0.304로 계산되었다. 주기가 감소할수록 빛 흡수율이 감소하는 양이 0.20, 0.21, 0.40, 0.76로 증가하여 감소하는 속도가 빨라진다.

에미터 전극 주기에 따른 광 흡수율 경향을 분석하기 위해 그림 3(b)에서 두 가지 분석 데이터를 비교해보았다. 먼저, 레퍼런스 소자의 개구 비율(aperture ratio)을 100%로 하여 전극의 주기에 따라 변하는 애퍼처 비율을 나타내었다. 그리고 에미터 전극이 없을 때의 광 흡수율을 기준(100%)으로 하여 전극의 주기에 따른 광 흡수율의 비율을 나타냈다. 전반적으로 개구 비율의 경향과 광 흡수율의 경향이 유사하게 나타난다. 전극의 주기가 작아질수록, 즉, 전극이 더 많이 배치될수록 광 흡수량은 적어지는데 주기가 작아짐에 따라 감소하는 비율이 더 커진다. 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때 개구 비율은 95.0%, 10  $\mu\text{m}$ 일 때 90.0%, 5  $\mu\text{m}$ 일 때 80.0%, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 60.0%로 계산된다. 한편 광 흡수율의 비율은 aperture ratio 대비 소량 더 큰 값을 보였으며, 전극 주기가 줄어드는 순서로 약 95.7%, 91.1%, 82.4%, 65.9%로 계산되었다. Aperture ratio와 absorption ratio 사이의 비율의 차이는

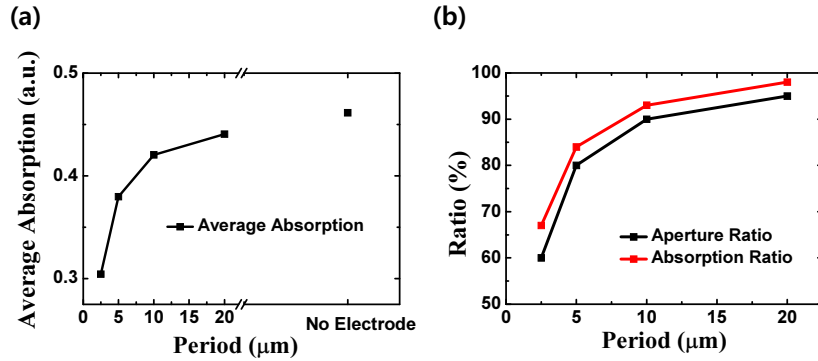


**Fig. 2.** (a) Spectral measurements when the period of emitter electrodes ( $P_1$ ) was changed from 20  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$ , and also with no emitter electrodes condition. (b, c) Real part (b) and imaginary part (c) of the refractive index values according to the wavelength.

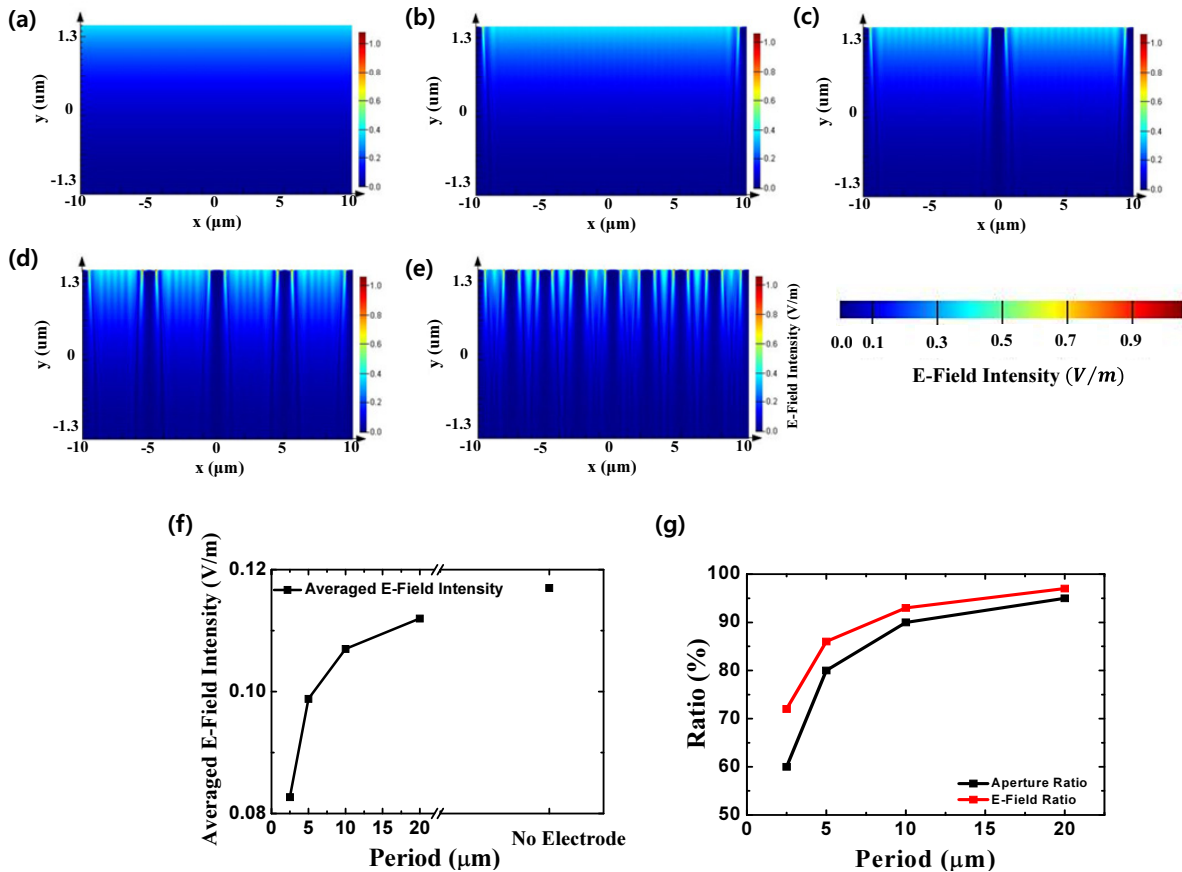
0.7%p, 1.1%p, 2.4%p, 5.9%p가 된다. 전극의 주기가 작을수록, 다시 말해 전극이 많이 배치되어 개구부의 크기가 작을수록 광 흡수율과 개구 비율의 차이는 더 커져, 개구부 대비 더 많은 양의 빛을 흡수할 수 있음을 알 수 있다.

개구 비율과 광 흡수율이 일치하지 않고 개구 비율에 따라 그 차이가 다르게 나타나는 현상을 좀 더 상세히 분석하기

위해 전기장(electric field, E-field)의 세기를 확인하였다. 그림 4는 전극의 주기에 따라 활성화 층 내의 전기장 분포를 계산한 그림이다. 앞서 태양 전지의 광 흡수율 스펙트럼에서 주기에 따른 변화가 두드러지게 나타난 단파장 영역 내에서 최댓값을 보인 500 nm 파장에서의 전기장 분포를 확인했다. 그림 4(a)는 레퍼런스 소자, 그림 4(b)는 에미터 전극의 주기



**Fig. 3.** (a) Averaged absorption when the period of emitter electrodes ( $P_1$ ) was changed from 20  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$ , and also with no emitter electrodes condition. (b) Comparing the ratio of the aperture (black line) and the averaged absorption (red line) according to the period of the emitter electrodes, assuming that the aperture ratio of the solar cell with no emitter electrodes is 100%.



**Fig. 4.** Calculated electric field intensity in the active layer of the solar cell at 500 nm wavelength range. (a), (b), (c), (d) and (e) represent the intensity of the electric field profile with varying the period of the emitter electrodes ( $P_1$ ): (a) No emitter electrodes, (b)  $P_1 = 20 \mu\text{m}$ , (c)  $P_1 = 10 \mu\text{m}$ , (d)  $P_1 = 5 \mu\text{m}$ , (e)  $P_1 = 2.5 \mu\text{m}$ . (f) Averaged electric field intensity according to  $P_1$ . (g) Comparing the aperture ratio of active layer (black line) and the rate of the averaged electric field intensity of each structure to that of the reference (red line).



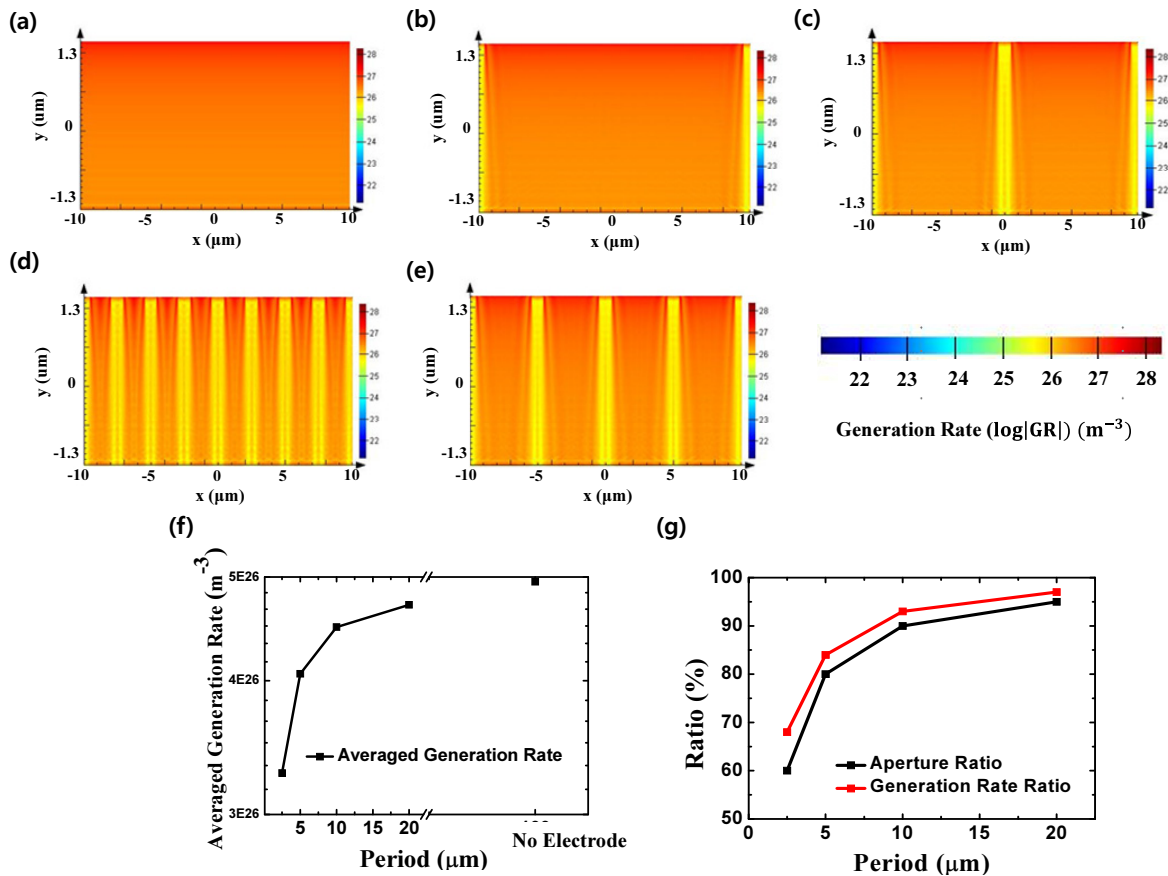
가 20  $\mu\text{m}$ , 그림 4(c)는 10  $\mu\text{m}$ , 그림 4(d)는 5  $\mu\text{m}$ , 그림 4(e)는 2.5  $\mu\text{m}$ 인 소자에 대한 데이터이다. 모든 소자에서 전기장은 활성화 층 상단부에서 가장 크게 나타났고, 하단부로 갈수록 줄어드는 경향을 보였다. 두꺼운 금속 전극에 의해 빛이 차단되어 에미터 전극의 아랫부분에서 전기장의 크기가 0에 가깝게 나타났고, 개구 영역은 빛이 투과하여 활성화 층 내로 흡수가 되며 이 부분은 레퍼런스와 마찬가지로 하단부로 내려갈수록 전기장의 세기가 작아진다. 한편, 전극의 양쪽 경계 부분에서는 전기장이 강하게 나타나 집광됨이 보이며, 집광의 형태가 빛의 진행방향을 따라 수직방향으로 그 폭이 넓어진다.

빛은 전자기파(electromagnetic wave)로 파동특성을 가지기 때문에 파장과 유사한 크기의 수  $\mu\text{m}$ 의 구조물에서 파면이 왜곡되어 회절(diffraction)이 일어날 수 있다. 이러한 효과로 활성화 층 내의 깊이 방향에 대해 전기장 분포가 빛이 투과하고 투과하지 않은 영역의 구분이 완벽하게 개구부와 일치하지는 않을 것이다. 또한 에미터 전극과 활성화 층 사이는 금속과 유전체의 경계면인데, 이러한 구조에서는 표면 플라즈몬이 발생하여 표면에서 국부적으로 전기장이 강하게 나타나고 빛이 집광되는 효과를 볼 수 있다. 또한 이 때 발생한 표면

플라즈몬은 표면을 따라 전파하는 특성도 보인다. 이러한 표면 플라즈몬의 여기와 회절의 효과가 복합적으로 작용하여 개구부 표면부에서의 전기장 세기 분포가 그림 4(a)의 레퍼런스처럼 표면방향(lateral, x축 방향)으로 일정하지 않고, 강/약이 반복되는 간섭무늬와 같은 결과가 나타났다.

활성층 내부의 흡광과 전기장 세기와의 관계를 정량적으로 분석하기 위해 그림 4(f)에 에미터 전극의 주기에 따른 활성화 층 내의 전기장 세기의 평균값을 나타냈다. 광 흡수율과 마찬가지로 전극의 주기가 줄어들수록 전기장의 세기가 줄어드는 것을 확인하였다. 전기장의 세기는 레퍼런스 소자의 경우  $1.15 \times 10^{-1}$  V/m이고, 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.12 \times 10^{-1}$  V/m, 10  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.07 \times 10^{-1}$  V/m, 5  $\mu\text{m}$ 일 때  $9.88 \times 10^{-2}$  V/m, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때  $8.27 \times 10^{-2}$  V/m로 계산되었다. 또한 그래프 상의 인접 데이터 구간 간의 전기장 데이터의 차이도  $0.03 \times 10^{-1}$  V/m,  $0.05 \times 10^{-1}$  V/m,  $0.08 \times 10^{-1}$  V/m,  $0.16 \times 10^{-1}$  V/m로 증가하여, 주기가 감소함에 따라 평균 전기장 값이 감소하는 속도가 빨라졌다.

그림 4(g)는 그림 3(b)와 같은 방법으로 개구 비율과 전기장의 비율을 비교한 그래프이다. 전기장의 비율은 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때 97.4%, 10  $\mu\text{m}$ 일 때 93.0%, 5  $\mu\text{m}$ 일 때



**Fig. 5.** Calculated generation rate at the active layer of the solar cell. (a), (b), (c), (d) and (e) represent the generation rate with varying the period of the emitter electrodes ( $P_1$ ): (a) No emitter electrodes, (b)  $P_1=20 \mu\text{m}$ , (c)  $P_1=10 \mu\text{m}$ , (d)  $P_1=5 \mu\text{m}$ , (e)  $P_1=2.5 \mu\text{m}$ . (f) Averaged generation rate according to  $P_1$ . (g) Comparing the aperture ratio of active layer (black line) and the rate of the averaged generation rate of each structure to that of the reference (red line).

85.9%, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 71.9%로, 모든 구간에서 개구 비율보다 높게 나타났다. 계산된 개구 비율과 전기장 비율의 차이는 전극의 주기가 줄어드는 순서로 각각 2.4%p, 3.0%p, 5.9%p, 11.9%p로 계산되어, 전극의 주기가 줄어들수록 그 차이가 증가했다.

다음으로, 태양 전지의 광 흡수층에서 전체 파장 대역의 태양광에 대한 광 흡수 경향을 분석하기 위해 generation rate을 계산하였다. 그림 5는 전극의 주기에 따라 활성화 층의 generation rate의 분포도와 그에 대한 분석 데이터이다. generation rate은 태양 전지의 활성화 층이 태양광을 받아 엑시톤(electron-hole pair, EHP)이 형성된 양을 나타낸 값으로 흡수된 모든 포톤(photon)이 엑시톤을 여기서킨다고 가정하여 계산된 것으로, 광의 총 흡수량과 같다고 볼 수 있다. 그림 5(a)는 레퍼런스, 그림 5(b)는 에미터 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ , 그림 5(c)는 10  $\mu\text{m}$ , 그림 5(d)는 5  $\mu\text{m}$ , 그림 5(e)는 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 계산된 generation rate의 분포도를 나타내었다. 전기장과 비슷하게 활성화 층 표면 상단부에서 엑시톤의 양이 가장 많았고, 하단부로 갈수록 줄어들지만 그 비율이 전기장보다는 작게 계산되었다. 또한 배치된 전극의 아래 부분의 포톤 형성이 없거나 극소량이었으며, 빛의 진행 방향, 즉 활성화 층의 깊이 방향(y축 방향)으로 전극 하부에서 전체적으로 완벽히 shadowing이 되지 않는 경향도 전기장과 비슷했다.

그림 5(f)는 에미터 전극의 주기에 따른 generation rate의 평균값을 나타낸 그래프이다. 전극의 주기가 줄어들수록 엑시톤의 형성량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 레퍼런스 소자의 generation rate는  $4.83 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 이며, 전극의 주기가 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때는 그 값이 레퍼런스 대비 약 68% 수준으로 감소하여  $3.28 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 으로 계산되었다. 또한 레퍼런스와 주기가 줄어들어 따라 generation rate의 평균값의 인접 데이터 간 차이는  $0.12 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ ,  $0.22 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ ,  $0.43 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ ,  $0.78 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 로 감소가 더 빨라진다. 그림 5(g)는 광 흡수율(그림 3(b))과 전기장 세기(그림 4(g))에서 비교한 것과 마찬가지로 개구 비율과 generation rate의 비율을 비교한 그래프이다. generation rate의 비율은 레퍼런스 대비 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때 97.5%, 10  $\mu\text{m}$ 일 때 93.0%, 5  $\mu\text{m}$ 일 때 84.1%, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 67.9%로 계산되었고, 역시 개구 비율 대비 높은 값을 보인다. 계산된 개구 비율과 generation rate 비율의 차이는 2.5%p, 3.0%p, 4.1%p, 7.9%p로 전극의 주기가 줄어들수록 차이가 증가하는 것으로 계산되었다.

그림 2(c)와 4(g), 5(g)를 비교했을 때 광 흡수율, 흡수층 내의 전기장 총량과 EHP 생성 총량 모두 주기가 줄어들수록 비선형적으로 감소하는 경향은 비슷했다. 또한 활성화 층 전체 영역에서 빛이 흡수될 수 있는 레퍼런스 소자와 비교하여, 에미터 전극이 배치되어 광 차단부가 생길 경우 개구 비율 대비 흡수량이 소량 크게 나타났고, 전극의 주기가 줄어들면서 개구 비율과의 차이가 증가하는 현상도 동일하게 나타났다. 전극의 주기가 5  $\mu\text{m}$ 에서 2.5  $\mu\text{m}$ 로 감소할 때 각 특성의 감소폭이 가장 컸다. 특히 2.5  $\mu\text{m}$  주기 구조에서는, 레퍼런스 소자 대비 광 흡수율은 약 67%, 500 nm 파장대역의 빛에

대한 전기장은 약 72%, 총 광 흡수량을 의미하는 generation rate은 68% 수준으로, 비선형적인 감소 경향이 지수 함수(exponential,  $e^x$ ) 분포를 따른다고 가정할 때 약  $1/e$  (~63%) 만큼 감소하는 지점으로 보인다. 전극 주기가 2.5  $\mu\text{m}$ 보다 더 작아져 개구 비율이 훨씬 작아질 경우, 광 흡수량은 개구 비율 대비 더 큰 흡수량을 얻을 수는 있겠으나, 광활성층 내의 총 광 흡수량이 60% 미만으로 줄어들어 태양전지의 효율적 성능을 기대하긴 어려울 것이다.

다음으로 FDTD 방법에서 계산된 EHP 생성 결과를 전기적 특성(전류 밀도, 전력 밀도)로 전환하는 계산을 진행하였다. 반도체의 자유 전하 밀도(density of free carriers) 모델 기반의 drift-diffusion equation과 정전기장 포텐셜(electrostatic potential)을 설명하는 Poisson's equation 기반의 시뮬레이션 계산 기반의 시뮬레이터(DEVICE, Lumerical Inc. Canada)를 이용했다. 전극의 주기( $P_1$ )만큼의 영역을 하나의 단위 태양 전지로 지정한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 에미터 전극 하단부와 활성화 층 상단부의 경계면에 전극의 영역만큼  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도로 n 도핑 영역을 지정하였고, 활성화 층 하단부와 베이스 전극의 경계면에 단위 태양 전지의 길이만큼  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도로 p 도핑 영역을 설정해주었다. 실리콘 태양전지의 p-n junction을 형성함에 있어 에미터 혹은 back-surface-field 영역 한 쪽을 더 높은 농도로 도핑한 경우 전력 변환 효율이 높다는 것이 보고되었고, 이를 구현하는 측면에서 공정성과 양산성을 고려하여  $n^+$  type 혹은  $p^+$  type 등의 구조가 적용되어왔다<sup>25,26</sup>. 본 연구에서는 이를 고려하여 p 도핑농도를 더 크게 잡아주었다. 이후 베이스 전극의 전압을 0 V부터 0.7 V까지 0.02 V 간격으로 변화시켜 그에 따른 전류를 계산하였다. 단, 이 경우 앞선 광학 계산과 다르게, 레퍼런스 소자의 경우 전하 수집을 위한 에미터 전극 1개를 배치하였고, 태양 전지의 단위 영역은 전극을 배치했을 때의 가장 큰 주기와 동일한 20  $\mu\text{m}$ 로 설정한 후 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 6은 베이스 전극의 인가 전압( $V_{base}$ )이 0 V부터 0.7 V까지 변할 때 계산된 전기적 특성을 나타낸 그래프이다. 그림 6(a)는 식 (1)로 계산된 전류 밀도( $J$ )를 나타낸 그래프이다.

$$J = I/A \text{ (mA/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

$I$ 는 전류를 의미하고  $A$ 는 전류가 흐른 활성화 층의 영역을 의미한다. 그림 6은 베이스 전압이 0 V부터 0.7 V까지 변할 때 계산된 전류 밀도를 나타낸 그래프이다. 태양전지 전압이 0일 때의 전류밀도인 단락 전류(short-circuit current,  $J_{sc}$ )는 광 흡수로 생성된 전하와 관련된 전류값이므로, 이상적으로 광생성 전류와 같다. 에미터 전극이 단독으로 있는 레퍼런스 소자와 주기에 따라 배치한 소자의 경우 모두 전압이 증가함에 따라  $J_{sc}$ 와 같은 일정한 값을 유지한 후 특정 전압 이후에서 전류가 급격하게 감소하는 경향을 나타낸다. 여기서 주기적인 전극 배치는 레퍼런스 소자 대비 전극의 수가 늘어나 전하의 수집을 효율적으로 하여  $J_{sc}$ 값이 더 커지게 된다. 앞

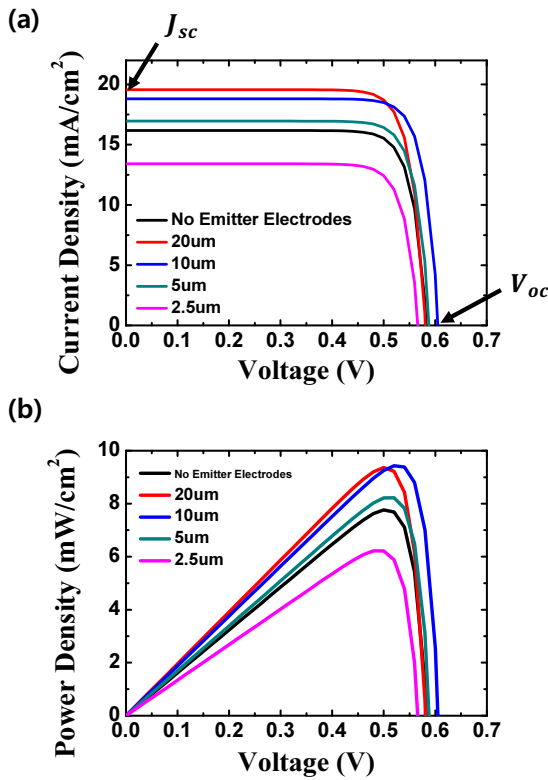


Fig. 6. Calculated electrical properties of the suggested solar cells: (a) current density and (b) power density according to the base voltage.

선 결과에서 전극 주기가 감소할수록 광 흡수량이 줄어들었으므로  $J_{sc}$ 도 감소하는 경향을 보일 것이라 예측할 수 있다. 전극 주기가 20  $\mu\text{m}$ 와 10  $\mu\text{m}$ 인 소자는 레퍼런스에 비해 높은 전류 밀도를 나타냈고, 5  $\mu\text{m}$ 일 때 그 값이 레퍼런스와 유사했으며 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 레퍼런스 소자에 비해 낮은 수치가 나왔다. 레퍼런스 소자의 전류 밀도는  $1.62 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ , 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.92 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ , 10  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.88 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ , 5  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.7 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ , 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때  $1.34 \times 10^2 \text{ mA/cm}^2$ 로 계산되었다.

개방 전압( $V_{oc}$ )은 전류 밀도가 0이 되는 지점의 베이스 전압으로 태양 전지에서 얻을 수 있는 최대 전압을 의미한다. 전극 배치가 달라지면 태양전지의 에미터와 베이스 사이의 전류 흐름, 에미터 전극 자체의 저항 등 태양전지의 직렬저항 성분에 변화가 생긴다. 그 결과  $V_{oc}$  근처에서의 전류-전압 곡선에 변화를 만들어낸다. 그 결과  $V_{oc}$ 는 전극 주기가 10  $\mu\text{m}$ 일 때 0.605 V로 가장 크게 나타났고, 주기가 더 작아질수록  $V_{oc}$ 가 작아져 5  $\mu\text{m}$ 일 때 0.588, 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때 0.566으로 나타났다. 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때에는  $V_{oc}$ 는 0.580 V로 레퍼런스 경우의 0.582 V와 유사한 값을 나타냈다.

그림 6(b)는 베이스 전압이 0 V부터 0.7 V까지 변할 때 계산된 전력 밀도( $P$ )를 나타낸 그래프이다. 전극의 유무에 상관없이 베이스 전압이 증가할 때 전력 밀도가 증가하고 베이스 전압이 약 0.5 V일 때 최댓값을 가진다. 이후 전압에서는

전력 밀도가 급격히 감소하는 경향이 있다. 전력 밀도( $P$ )는 식 (2)로 계산된다.

$$P = J \times V_{base} \quad (\text{mW/cm}^2) \quad (2)$$

전력 밀도의 최댓값은 레퍼런스 소자의 경우 약  $7.77 \text{ mW/cm}^2$ , 전극의 주기가 20  $\mu\text{m}$ 일 때  $9.36 \text{ mW/cm}^2$ , 10  $\mu\text{m}$ 일 때 약  $9.43 \text{ mW/cm}^2$ , 5  $\mu\text{m}$ 일 때  $8.22 \text{ mW/cm}^2$ , 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때  $6.22 \text{ mW/cm}^2$ 가 나왔다.

전극의 면적이 늘어날수록 전하의 수집율이 높아져 전류밀도 및  $J_{sc}$ 가 커지지만, 개구 비율이 줄어들어 따라 광 흡수량이 줄어들기 때문에 생성되는 전하량이 줄어들어  $J_{sc}$ 와 전력 값이 작아진다. 또한 에미터 전극 면적이 늘어남에 따라 태양전지의 저항성분이 변화하는데 이는  $V_{oc}$  조건에서의 전류-전압 특성에 영향을 끼치고, 결과적으로 전력 밀도에도 변화가 생긴다. 본 연구에서는 1  $\mu\text{m}$ 의 폭을 가지는 전극을 주기적으로 배열하여 개구부가 전체 면적의 95~60%가 되는 범위에서 전극 면적에 대한 광학적, 전기적 특성을 검토하였다. 이 범위 내에서는 전극 면적이 늘어나 그 주기가 10  $\mu\text{m}$  (개구 비율이 90%)일 때 전력 밀도가 최댓값을 보였으며 이는 레퍼런스 소자와 비교하여 약 20% 향상된 값이다. 주기가 줄어들수록 전류 및 전력 밀도가 작아져 주기가 줄어들어 2.5  $\mu\text{m}$ 일 때는 오히려 약 21% 수준만큼 감소했다.

### III. 결 론

본 연구에서는 태양전지 중 가장 단순한 형태의 평면 무기 태양 전지의 에미터 전극 배치를 통해 설계 변수에 따른 광학적 특성과 전기적 특성 간의 최적 조건을 찾는 구조를 도출하였다. 에미터 전극이 없는 레퍼런스 소자와 전극의 주기를 최대 20  $\mu\text{m}$ 에서 최소 2.5  $\mu\text{m}$ 까지 조절하여 시뮬레이션을 진행하였다. 광학적 특성인 광 흡수율, 전기장, generation rate 모두 주기가 줄어들수록 계산된 값이 감소하는 경향을 나타내었다. 이 경향성은 전극 배치에 따른 개구부의 비율과 유사한 값을 가지지만, 전체적으로 개구 비율 대비 높은 값을 보였으며 전극의 주기가 줄어들수록, 다시 말해 개구 비율이 낮은 조건일수록 개구 비율과 광 흡수량 간의 차이는 크게 나타나 개구 비율보다 더 많은 양의 광을 흡수할 수 있음을 보였다. 하지만 개구부가 줄어들수록 절대적인 광흡수량이 줄어들어 인해 전기 생성 측면에서 확인한 전류 밀도와 전력 밀도가 작아진다. 또한 전극 배치로 인한 태양전지의 저항성분의 변화로  $V_{oc}$ 값과 그 주변 조건에서의  $J-V_{base}$  곡선의 형태가 변한다. 이러한 요소가 복합적으로 작용하여 개구부가 약 90%인 구조에서 최대 전력 밀도를 얻을 수 있었다. 본 연구 결과는 태양전지에서 광전효과로 발생한 전하를 효율적으로 수집할 수 있는 에미터 전극 설계방안을 제시함으로써 태양전지의 성능을 최적화하고 상용화하는 데 좋은 가이드가 될 것이다.

## 감사의 글

This work was supported by the Basic Science Research Programs through the National Research Foundation of Korea (NRF), Ministry of Education, under Grant NRF-2018R1D1 A1B07045853.

## References

1. M. Wolf, "A new look at silicon solar cell performance," *Energy Convers.* **11**, 63-73 (1971).
2. P. V. Kamat, "Meeting the clean energy demand: Nanostructure architectures for solar energy conversion," *J. Phys. Chem. C* **7**, 2834-2860 (2007).
3. J. M. Gineste, G. Flamant, and G. Olalde, "Incident solar radiation data at Odeillo solar furnaces," *J. Phys. IV France* **9**, Pr3-623-Pr3-627 (1999).
4. A. V. D. Rosa, *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, 2nd ed, (Academic Press, Boston, USA, 2009), pp. 591-682.
5. M. Grundmann, *The physics of semiconductors: An introduction including devices and nanophysics*, 2nd ed. (Springer, Berlin, Germany, 2006), pp. 473-521.
6. NREL, *Best Research-Cell Efficiency Chart* (National Renewable Energy Laboratory, 2019), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
7. H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: An overview," *J. Mater. Res.* **19**, 1924-1945 (2004).
8. R. Schroeder and B. Ullrich, "Photovoltaic hybrid device with broad tunable spectral response achieved by organic/inorganic thin-film heteropairing," *Appl. Phys. Lett.* **81**, 556-558 (2002).
9. C. H. Lee, G. Yu, D. Moses, and A. J. Heeger, "Picosecond transient photoconductivity in poly (*p*-phenylenevinylene)," *Phys. Rev. B* **49**, 2396-2407 (1994).
10. G. Wei, S. Wang, K. Sun, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, "Solvent-annealed crystalline squaraine: PC<sub>70</sub>BM (1:6) solar cells," *Adv. Energy Mater.* **1**, 184-187 (2011).
11. C. W. Tang, "Two-layer organic photovoltaic cell," *Appl. Phys. Lett.* **48**, 183-185 (1986).
12. N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, and F. Wudl, "Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene," *Science* **258**, 1474-1476 (1992).
13. S. Badgujar, C. E. Song, S. Oh, W. S. Shin, S.-J. Moon, J.-C. Lee, I. H. Jung, and S. K. Lee, "Highly efficient and thermally stable fullerene-free organic solar cells based on a small molecule donor and acceptor," *J. Mater. Chem. A* **4**, 16335-16340 (2016).
14. W. Zhao, S. Li, S. Zhang, X. Liu, and J. Hou, "Ternary polymer solar cells based on two acceptors and one donor for achieving 12.2% efficiency," *Adv. Mater.* **29**, 1604059 (2017).
15. J. You, L. Dou, K. Yoshimura, T. Kato, K. Ohya, T. Moriarty, K. Emery, C.-C. Chen, J. Gao, G. Li, and Y. Yang, "A polymer tandem solar cell with 10.6% power conversion efficiency," *Nat. Commun.* **4**, 1446 (2013).
16. S. Nam, J. Seo, S. Woo, W. H. Kim, H. Kim, D. D. C. Bradley, and Y. Kim, "Inverted polymer fullerene solar cells exceeding 10% efficiency with poly (2-ethyl-2-oxazoline) nanodots on electron-collecting buffer layers," *Nat. Commun.* **6**, 8929 (2015).
17. M. A. Green, "The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution," *Prog. Photovoltaics* **17**, 183-189 (2009).
18. C. Park, J. Cho, Y. Lee, J. Park, M. Ju, Y.-J. Lee, and J. Yi, "Technology trends and prospects of silicon solar cells," *Curr. Photovoltaics Res.* **1**, 11-16 (2013).
19. J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green, "24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates," *Prog. Photovoltaics* **7**, 471-474 (1999).
20. K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, "Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell," *IEEE J. Photovoltaics* **4**, 1433-1435 (2014).
21. M.-S. Kim, M.-G. Kang, L. J. Guo, and J. Kim, "Choice of electrode geometry for accurate measurement of organic photovoltaic cell performance," *Appl. Phys. Lett.* **92**, 133301 (2008).
22. M. Li, H. Ma, H. Liu, D. Wu, H. Niu, and W. Cai, "Effect of electrode geometry on photovoltaic performance of polymer solar cells," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 435104 (2014).
23. E. D. Palik, "Optical parameters for the materials in HOC I, HOC II, and HOC III," in *Handbook of Optical Constants of Solids*, E. D. Palik, ed. (Academic Press, Orlando, USA, 1997), Vol. 3, pp. 187-227.
24. H.-J. Hagemann, W. Gudat, and C. Kunz, "Optical constants from the far infrared to the x-ray region: Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *J. Opt. Soc. Am.* **65**, 742-744 (1975).
25. J. G. Fossum and E. L. Burgess, "High-efficiency *p*<sup>+</sup>-*n*<sup>+</sup> back-surface-field silicon solar cells," *Appl. Phys. Lett.* **33**, 238 (1978).
26. M. Becker, U. Gösele, A. Hofmann, and S. Christiansen, "Highly *p*-doped regions in silicon solar cells quantitatively analyzed by small angle beveling and micro-Raman spectroscopy," *J. Appl. Phys.* **106**, 074515 (2009).