



태양전지의 양자효율 측정 및 분석

김영국¹ , 오동현², 박진주³, 이준신² 

¹ 성균관대학교 정보통신대학

² 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과

³ 청주대학교 에너지융합공학과

초록: 본 논문은 대학연구실과 산업현장에서 태양전지를 연구 개발하는 초년생들이 태양전지 성능 분석하는 데 있어 가장 기본적이면서도 중요한 양자효율(quantum efficiency) 측정, 분석 방법에 이해를 돕는 것을 목적으로 한다. 양자효율의 정의를 시작으로, 측정 방법, 분석 방법에 대한 자세한 소개와 함께 태양광 스펙트럼으로부터 태양전지 소재의 밴드 갭에 따른 이론적인 전류밀도를 계산하고, 이론적인 전류밀도와 양자효율 측정, 분석을 통해 태양전지의 성능을 분석하는 방법에 대해 깊이 있게 논의한다. 태양전지의 양자효율 측정 분석은 태양전지를 깊이(전면, bulk, 후면)에 따라 분석할 수 있어 태양전지 성능 분석에 직관을 줄 수 있는 매우 유용한 방법이다. 이론적 전류밀도와 양자효율 측정 분석에 대한 깊은 이해로 태양전지를 연구하는 학생과 연구원들이 태양전지의 성능 분석을 하는 데 있어 기반으로 활용할 수 있기를 기대한다.

키워드: 실리콘 태양전지, 양자효율, 태양전지 이론적 전류밀도, Tandem 태양전지

Quantum Efficiency Measurement and Analysis of Solar Cells

Youngkuk Kim¹, Donghyun Oh², Jinjoo Park³, and Junsin Yi²

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

² Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

³ Department of Energy Convergence Engineering, Cheongju University, Eumseong 27739, Korea

(Received May 23, 2023; Revised June 12, 2023; Accepted June 13, 2023)

Abstract: The purpose of this paper is to help those who research and develop solar cells in university laboratories and industrial sites understand the most basic and important quantum efficiency measurement and analysis method in analyzing solar cell performance. Starting with the definition of quantum efficiency, we calculate the theoretical current density according to the band gap of the solar cell material from the solar spectrum, along with a detailed introduction to the measurement and analysis methods, and measure and analyze the theoretical current density and quantum efficiency. We discuss in depth how to analyze the performance of solar cells through Quantum efficiency measurement and analysis of solar cells is a very useful method that can give intuition to solar cell performance analysis as it can analyze solar cells according to depth (front emitter, bulk, rear surface). Students and researchers who study solar cells with a deep understanding of theoretical current density and quantum efficiency measurement analysis are expected to use it as a basis for analyzing solar cell performance.

Keywords: Silicon solar cell, Quantum efficiency, Theoretical current density

✉ Youngkuk Kim; bri3tain@skku.edu

Junsin Yi; junsin@skku.edu

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서문

■ 현재 가장 일반적으로 양산되고 있는 태양전지는 실리콘 기반의 PERC (passivated emitter rear contact) 구조의 p-type 태양전지이다 [1]. PERC 태양전지의 기존의 후면 Al 전극을 후면 전체에 도포하여 소성을 통해 BSF (back surface field)를 형성하는 초기 태양전지의 후면 재결합을 개선하는 구조의 태양전지이다. PERC 태양전지의 일반적인 제작공정은 p-type 실리콘 웨이퍼(~150 μm 두께)를 이용하여 표면 반사를 줄이고, 광흡수를 높이기 위한 표면조식화 공정(texture), p-n 접합을 형성하기 위한 도핑(doping or diffusion) 공정, p-n 접합을 분리하기 위한 isolation 공정, 후면 패시베이션을 위한 Al₂O₃/SiN_x 증착공정, 후면 전극 형성을 위한 laser ablation 공정, 전면(n-type 도핑층) 패시베이션과 반사방지막을 위한 SiN_x 증착 공정, 전, 후면 전극을 형성하는 screen printing 공정 및 소성 공정으로 이루어진다 [2]. TFT (thin film transistor)와 같은 다른 소자들이 일정 영역에서의 전압과 전류를 필요로 하는 것과 다르게 태양전지는 최대출력(최대 전압, 최대전류)을 요구하는 소자로 모든 공정이 최적화해야만 가능하다. 위에 설명된 태양전지 제작 공정은 각각 따로 작용하는 것이 아니라, 공정과 공정이 서로 연계되기 때문에 태양전지 제작 후 각각의 공정에 대한 영향을 개별적으로 분석하는 것은 거의 매우 어렵다. 예를 들어, 텍스처 공정은 일반적으로 알칼리 용액을 이용하여 피라미드 형태를 형성하는 공정으로 가장 먼저 진행되는 공정이다. 텍스처 후 웨이퍼 표면의 구조와 피라미드의 크기는 다음에 진행되는 도핑 공정 후의 에미터 면저항에 영향을 주고, 반사방지막인 SiN_x의 두께

에도 영향을 주며, screen printing 공정에서도 전극의 퍼짐 현상에도 영향을 준다. 도핑 공정의 면저항은 도핑 농도뿐만 아니라 p-n 접합의 깊이 와도 관련이 있어 전극 소성 공정에서의 페이스트의 특성이나 소성 온도에도 영향을 준다. 이와 같이 각 공정이 다른 공정에 영향을 주기 때문에, 각각의 공정에 의한 영향을 개별로 분석하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 이러한 이유로 태양전지를 연구하는 많은 연구자들은 주로 태양전지 전면, bulk, 태양전지 후면으로 나누어서 분석하고, 가장 loss가 큰 부분에 대해 개선 방향을 찾는다. 따라서 전면, bulk, 후면을 구분하여 분석하는 것이 매우 중요하다. Bulk 부분은 웨이퍼의 품질에 가장 영향을 받고, 전반적인 반사도에 영향을 받는다. 전면의 경우, texture 공정 후의 표면 결함, 세정 공정, 도핑공정, SiN_x 반사방지막 공정이 영향을 주며, 후면의 경우, isolation 공정, Al₂O₃/SiN_x 후면 패시베이션 공정 및 후면 반사 등이 영향을 줄 수 있다.

■ 양자효율 분석은 광의 파장에 따른 실리콘 내부에서의 흡수 깊이 차이를 이용하여 태양전지의 전면, bulk, 후면을 분리해서 분석이 가능한 유용한 방법으로 태양전지의 깊이에 따른 특성에 대해 직관을 줄 수 있다. 양자효율(QE, quantum efficiency)은 [생성된 전자(electron) 수/입사된 광자(photon) 수]로 정의된다. 즉 입사된 광자 수에 의해 생성된 전자의 수가 몇 개인지를 나타낸다. 이상적으로 특정 파장에서 입사된 광자에 의해 전자가 모두의 생성된다면, QE는 1 (unity)이 된다. 태양전지 소재의 밴드갭보다 작은 광은 흡수되지 않고 투과하기 때문에 밴드갭 이하에서 QE는 0이 된다. 이상적인 QE는 그림 1에서와 같이 사각형의 형태를 띠지만, 모든 태양전지의 QE는 carrier의 재결합에 의해 감소하게

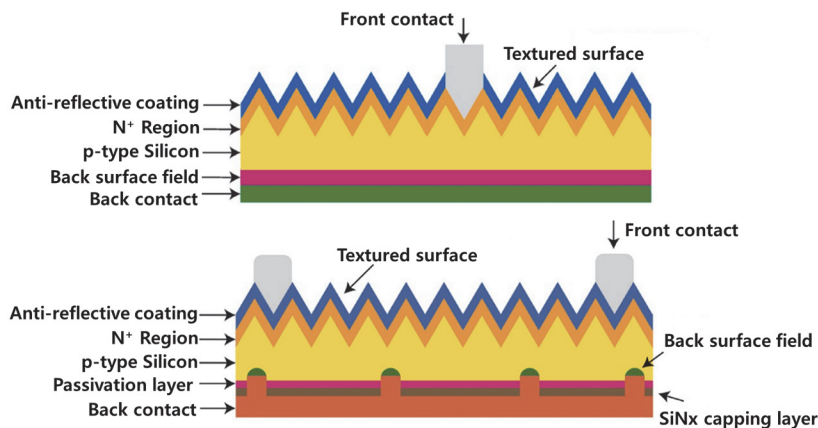


Fig. 1. Solar cell structure (a) BSF solar cell and (b) PERC solar cell.

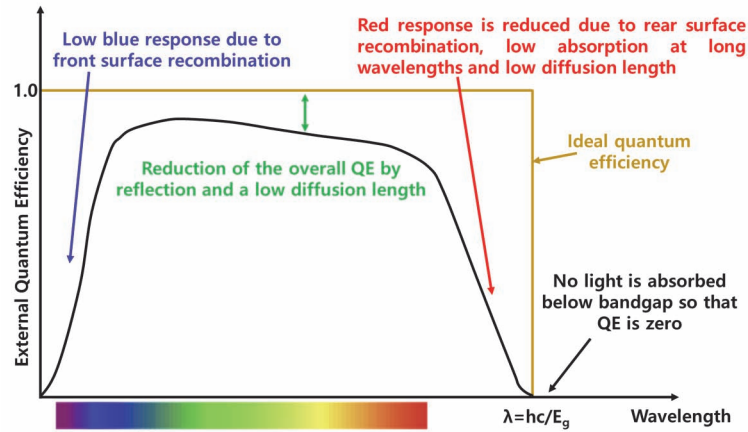


Fig. 2. Quantum efficiency of solar cell [3].

된다. 예를 들어 광이 입사되는 전면 표면에 결함 (defect)가 존재할 경우, 단파장 영역(~450 nm, blue light)에서의 QE가 감소하게 되는데, 이는 단파장의 흡수계수가 커서 태양전지의 표면에서 거의 모든 광이 흡수되기 때문이다. 비슷하게 green light의 경우, 태양전지의 표면보다 더 깊은 곳까지 도달할 수 있기 때문에 bulk에서의 QE 특성을 볼 수 있으며, 반사와 웨이퍼 내에서의 carrier diffusion length에 의해 제한된다. 장파장영역(900 nm~, red light)의 QE는 태양전지 후면에서의 재결합과, 장파장의 낮은 흡수와 carrier diffusion length에 의해 영향을 받는다 [3].

QE는 외부양자효율(EQE, external quantum efficiency)과 내부양자효율(IQE, internal quantum efficiency)로 구분되는데, EQE의 경우, 태양전지에 조사된 광을 기준으로 하며, IQE의 경우, 태양전지에서 반사와 투과된 광을 제외한 태양전지에 흡수된 광을 기준으로 하기 때문에 항상 IQE가 EQE보다 높게 나타난다. IQE 측정을 위해서는 측정하고자 하는 태양전지의 정확한 반사도를 측정해야 한다. 일반적으로 QE 측정장치에는 태양전지와 같이 표면에 피라미드 구조와 같이 난반사가 일어나는 구조의 반사도를 측정하기 위한 반사도 측정장치(integrating sphere)가 설치되어 있다.

- 분광응답특성(SR, spectral responsivity)은 QE와 비슷한 개념으로 사용되지만, SR은 [생성된 전류/입사된 파워]로 정의되며, 입사된 파워에 의해 생성된 전류로 양자효율과는 개념이 좀 다르다고 할 수 있다. 양자효율이 '입사된 광의 파장에 따라 전자를 얼마나 효율적으로 생성했나?'를 보여준다면, SR의 경우 입사된 각 파장의 파워에 의해 얼마나 많은 전류를 생성했는지를 보여준다.

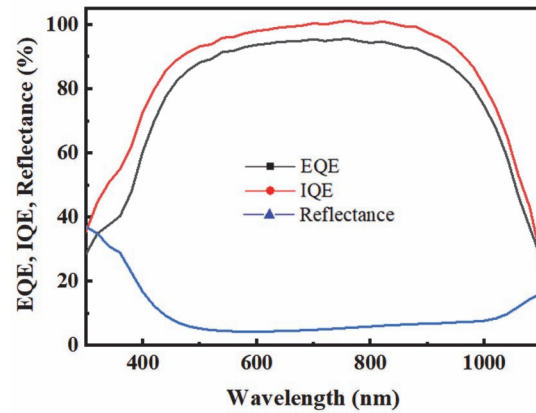


Fig. 3. EQE, IQE and reflectance.

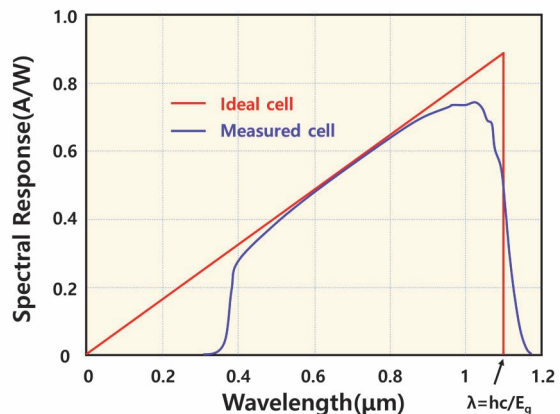


Fig. 4. SR, spectral responsivity [4].

밴드 갭보다 작은 장파장 영역에서의 SR은 QE와 마찬가지로 광흡수가 일어나지 않기 때문에 0으로 나타난

다. 이상적인 QE가 사각형의 형태를 띠지만, SR에서는 단파장 광의 에너지가 크기 때문에 단파장 영역에서의 SR이 낮게 나타난다. 300 nm 근처에서 SR이 0에 가까운 수치를 보이는데, 이는 태양전지 모듈의 glass가 단파장 영역을 cut-off 하기 때문이다. QE와 SR은 비슷한 개념으로 아래와 같은 관계로 서로 전환될 수 있다.

$$QE = \frac{SR \cdot hc}{\lambda \cdot e} \tag{1}$$

여기서 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ joule · s는 플랑크 상수 (Plank's constant), $c = 2.998 \times 10^8$ m/s는 광속(the speed of light), λ 는 파장, e 는 전자의 전하량을 의미하며, SR의 단위는 A/W이다.

- QE 분석을 위해서는 광의 흡수 특성을 이해할 필요가 있다. 광이 특정한 물질에서 흡수될 때의 광의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{2}$$

여기서 I_0 는 광의 초기 세기, I 는 x 깊이를 투과한 광의 세기, α 는 흡수계수(absorption coefficient)이다. 함수의 지수는 단위(dimension)를 가지지 않기 때문에 흡수계수 α 의 단위는 cm^{-1} 이다. 광의 흡수 깊이(광의 물질 속에서 투과 깊이)는 $\alpha x = 1$ (unity)이 되는 x 값으로 정의된다 [5]. 따라서 흡수계수가 클수록 흡수 깊이는 작다. 높은 에너지의 광(단파장 광)은 흡수계수가 매우 크기 때문에 실리콘의 표면 근처에서 거의 모든 빛이 흡수된다. 태양전지에 적용하면, 단파장 광은 태양전지의 전면 표면, 즉 도핑층과 공핍층(depletion) 영역에서 거의 흡수되기 때문에 단파장 영역의 QE 값은 태양전지 표면의 품질을 대변할 수 있다. 반대로 낮은 에너지의 광(장파장 광)은 흡수계수가 매우 낮아 실리콘의 깊은 곳까지 도달할 수 있다. 1,000 nm 이상의 광의 경우, 흡수 깊이가 150 μm 이상으로, 이는 현재 양산에서 사용하고 있는 실리콘 웨이퍼의 두께와 비슷하다. 다시 말하면 1,000 nm 이상의 광은 실리콘 웨이퍼의 전체를 투과할 수 있다는 것을 의미하며, 이러한 장파장의 광 흡수를 증가시키기 위해서는 후면에서 반사가 크게 일어나는 구조를 형성하여야 한다.

밴드 갭이 약 1.12 (약 1,107 nm)인 실리콘(red)의 경우, 흡수계수가 다른 물질에 비해 전반적으로 낮고, 장파장 영역에서 수직적으로 감소하지 않고, 밴드 갭(1,107 nm) 이상에서도 일부 흡수가 존재하는데 이는 실리콘이 indirect bandgap을 갖기 때문이다.

- 이론적인 태양전지 전류밀도 계산

앞서 언급한 바와 같이 태양전지 물질에 따라 광 흡수가 다르기 때문에, 광에 의해 생성되는 전자-정공 쌍

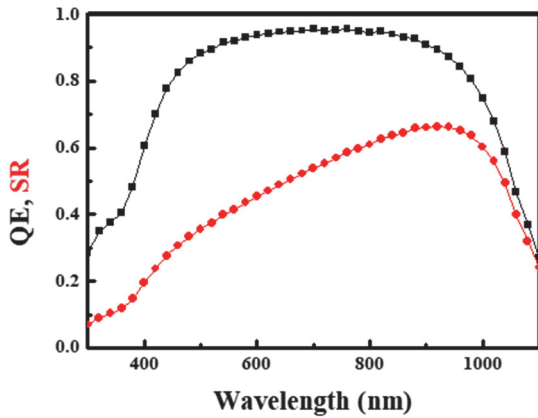


Fig. 5. QE and SR.

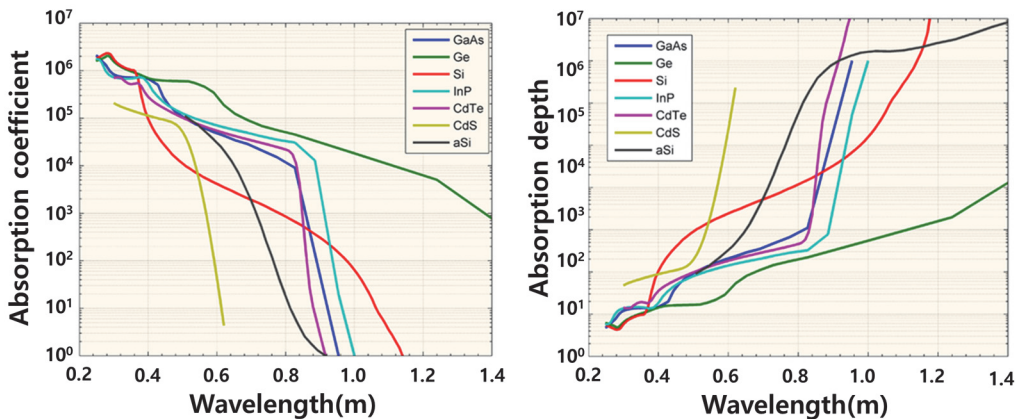


Fig. 6. Absorption coefficient and absorption depth of the various materials [6,7].

(electron-hole pair)이 다르고, 이에 따라 생성되는 전류 또한 다르게 나타난다. 소재에 따른 이론적인 전류밀도 한계를 알고 있다면, 태양전지 제작 후 생성된 전류에 대한 직관을 가질 수 있으며, QE 특성과 같이 분석을 통해 유용한 정보를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 가장 기본적인 실리콘 태양전지를 기준으로 이론적인 전류밀도의 한계를 계산하는 방법을 소개한다.

태양전지는 태양광을 이용하기 때문에, 이론적인 전류밀도는 solar irradiance (at 1.5 AM)로부터 계산할 수 있다. Solar irradiance (at 1.5 AM)는 호주의 UNSW (University of New South Wales) 대학 [8] 또는 NREL (National Renewable Energy Lab.) 연구소 [9]의 웹사이트에서 엑셀 파일로 다운받을 수 있다. 그림 7은 solar Irradiance 데이터를 도식화한 그래프이다. Solar irradiance는 일정 파장에서의 power density로 표현되기 때문에 단위는 $Wm^{-2}nm^{-1}$ 이다. 따라서 solar irradiance에 주어진 파장을 곱하여 power density (Wm^{-2})를 계산할 수 있다. 여기서 조심할 것은 solar irradiance가 연속적으로 측정된 것이 아니기 때문에 각 파장에서의 solar irradiance는 다음 파장까지의 interval 구간에서의 평균값이다. 따라서 주어진 파장이 아니라 파장의 interval을 곱해야 한다. Power density (Wm^{-2})는 $W=J/sec$ 을 대입하여 $J \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ 로 전환이 가능하고, 다시 J (Joule)을 eV로 전환하여 $eV \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ 로 표현이 가능하다. $eV \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ 로 표현되는 power density는 태양광에서 일정 파장의 광이 가지고 있는 전체 에너지를 의미한다. 따라서 일정 파장이 갖는 에너지로 나누게 되면 그 파장의 photon (광자) flux ($\# \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$)를 알 수 있다. 파장과 에너지와의 관계는 다음과 같다.

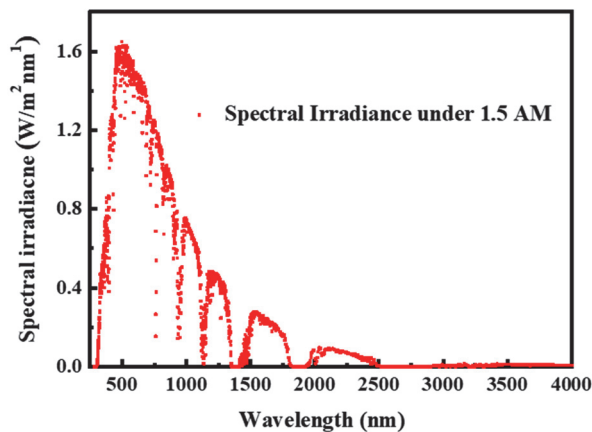


Fig. 7. Solar Irradiance under 1.5 AM.

$$E(eV) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.2397}{\lambda(nm)} \tag{3}$$

여기서 h 는 플랑크 상수, c 는 광속, λ 는 주어진 파장으로 단위는 nm이다.

일반적으로 하나의 광자가 하나의 전자를 생성하기 때문에 광자 수는 이론적으로 생성되는 전자 수로 전환될 수 있다. 전자의 개수와 전하량($1.6 \times 10^{-19} C$)을 곱하고, 전류 $I(A)=dQ(C)/dt(sec)$ 로 전환하여 일정 파장에 최대 생성 가능한 전류밀도를 계산할 수 있다. 모든 파장에서 생성 가능 전류밀도를 각각 계산하고, 모든 파장 영역(280~4,000 nm)에서 전류밀도 값을 합산하면 1.5 AM 조건에서의 태양광에 의해 생성될 수 있는 총 전류밀도 값($69 mA/cm^2$)을 얻는다. 이는 태양전지가 태양광을 모두 흡수하였을 경우, 최대전류밀도를 의미한다. 태양전지는 소재에 따라 다른 에너지 밴드 갭을 갖고, 에너지 밴드갭 이상의 광만 흡수할 수 있기 때문에 각 물질이 갖는 에너지 밴드 갭에 상응하는 파장보다 작은 모든 파장의 전류밀도를 합산하면 특정 소재의 태양전지에서 얻을 수 있는 최대전류밀도를 알 수 있다. Si을 예로 들면, 밴드 갭이 약 1.12 eV로 파장으로 전환하면 약 1,107 nm가 된다. 따라서 280~1,107 nm까지 전류밀도를 합산하여 $43.8 mA/cm^2$ 의 전류 값을 얻을 수 있다. 이 값은 결정질 Si을 이용하여 태양전지를 제작할 경우, 이론적으로 최대전류가 $43.8 mA/cm^2$ 이라는 의미이다. 실리콘 태양전지는 상부 전극에 의한 shadowing loss, 전극 저항, 표면 결함 등에 의해 전류가 감소하기 때문에 최대전류보다는 적은 전류 값을 갖는데, 일반적으로 상용되고 있는 PERC 태양전지의 경우 이러한 손실로 약 $40 mA/cm^2$ 정도의 전류 값을 보인다. 실제 실리콘 태양전지 제작 시에는 도핑 공정으로 donor/acceptor 레벨이 생성되기 때문에 밴드 갭(1.12 eV)보다 조금 작은 에너지의 광도 흡수가 가능하여 약 1,200 nm까지 흡수가 가능하고, 이때의 최대전류는 약 $46.5 mA/cm^2$ 까지 가능하다. 박막 실리콘 태양전지는 약 1.75 eV를 갖기 때문에 약 $21 mA/cm^2$ 의 최대전류를 갖는다. 박막 실리콘의 경우 흡수계수가 결정질 실리콘보다 수십 배 이상으로 크기 때문에 결정질 실리콘보다 수십 배 얇은 두께로 태양전지 제작이 가능하나, 증착 박막의 특성상 많은 결함을 가지고 있어 실제 태양전지의 전류 값은 약 $15 \sim 16 mA/cm^2$ 이다. 전류밀도 계산과정을 그림 8에 나타냈다.

소재에 따른 최대전류밀도를 계산하는 것은 태양전지 분석에 있어 매우 유용하다. 우선 연구자가 연구 개발을 통해 제작한 태양전지의 전류밀도 수준에 대해 직관

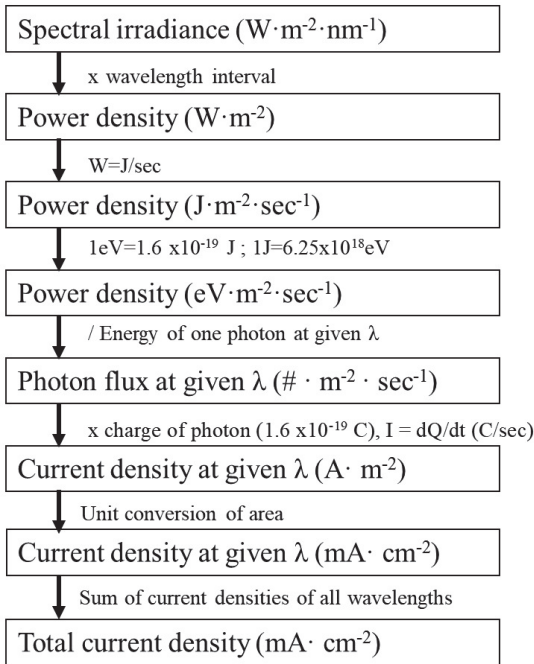


Fig. 8. Theoretical current density calculation procedure.

을 갖을 수 있으며, 반사, 투과 등을 고려해 전류밀도에 대한 loss 분석에 활용할 수 있다. 또한 파장에 따른 전류밀도를 알고 있기 때문에, 간단히 QE와의 곱을 통해서 실제 제작된 태양전지의 각 파장에서의 전류밀도를

계산할 수 있다. 따라서 이론적인 전류밀도 계산은 개선된 공정 변화를 통해 어느 정도의 전류밀도가 향상되는지를 파장을 분할해서 계산할 수 있기 때문에 좀 더 정확한 수치를 얻을 수 있다.

2. 양자효율 측정 및 분석

2.1 양자효율 측정 장치

- QE 측정장치는 여러 업체로부터 여러 가지 모델이 판매되고 있으나, 측정 방법이나 원리가 비슷하기 때문에 하나의 장비를 이해하면, 다른 장비도 어렵지 않게 사용할 수 있다.

일반적으로 Light source로 Xe lamp 같은 백색광이 사용된다. 광은 슬릿을 통과해 Monochrometer를 통해서 하나의 파장으로 전환되고 beam splitter에 의해 나뉘어 monitor cell과 측정하는 태양전지로 입사한다. Reflecting mirror는 substrate holder의 태양전지에 광이 입사할 수 있도록 경로를 만들고 test device는 태양전지로부터 측정 데이터를 수집한다. Integrating sphere는 앞에서 설명한 바와 같이 반사도를 측정하는 모듈이며, bias light는 tandem 태양전지를 측정할 때 사용하는 bias light이다 (2.1.2 tandem 태양전지 QE 측정 참조).

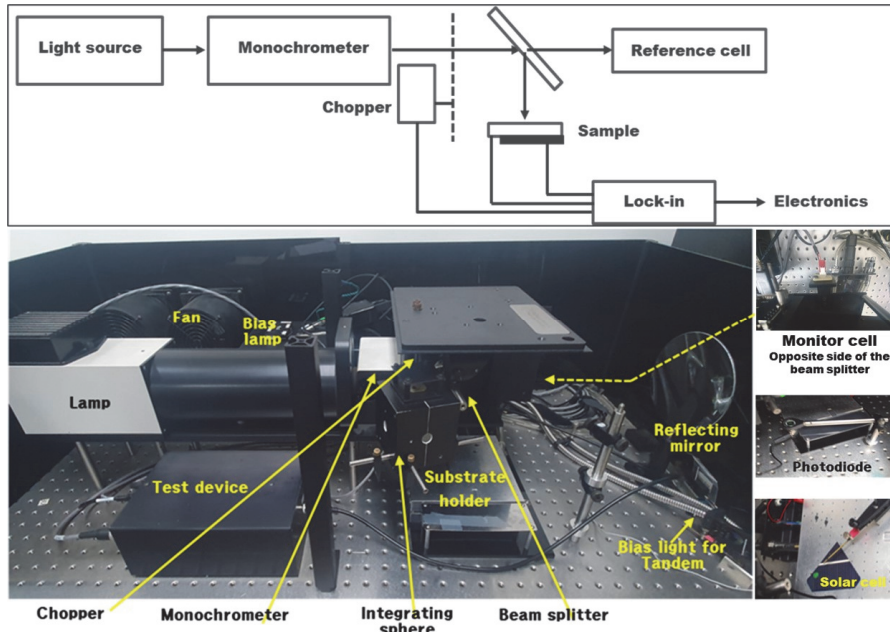


Fig. 9. QE schematic diagram and configuration of QE measuring device.

Test device에서 측정된 데이터는 다음 식을 이용하여 QE 데이터를 산출한다.

$$QE(\lambda) = \frac{100\% \cdot h \cdot c \cdot I_{TD}(\lambda)}{e \cdot \lambda \cdot I_{MON}(\lambda) \cdot CV_{MON}(\lambda)} \quad (4)$$

h 는 플랑크 상수, c 는 광속, λ 는 주어진 파장, e 는 전자의 전하량(electron charge), $I_{MON}(\lambda)$ 는 monitor-cell의 전류, $CV_{MON}(\lambda)$ 는 monitor-cell의 calibration value (W/A) 그리고 $I_{TD}(\lambda)$ 는 test device에서 측정된 전류이다.

■ QE는 정확한 QE 값을 알고 있는 포토 다이오드를 reference로 사용하여, 실제 태양전지의 측정 데이터의 QE 값을 계산한다. 일반적으로 실리콘태양전지는 300~1,200 nm 범위에서 측정하기 때문에 밴드 갭이 같은 실리콘 다이오드를 사용하지만, 1,200 nm 이상의 장파장 측정을 위해서는 Ge과 같이 밴드 갭이 작은 다이오드를 사용한다. Reference 다이오드 데이터는 매우 중요하다. Reference 다이오드가 노화되어 기존 데이터와 다를 경우, 모든 측정데이터에 에러가 발생한다. 따라서 주기적인 calibration이 필요하고 다시 측정된 정확한 데이터를 이용하여 QE를 측정해야 한다.

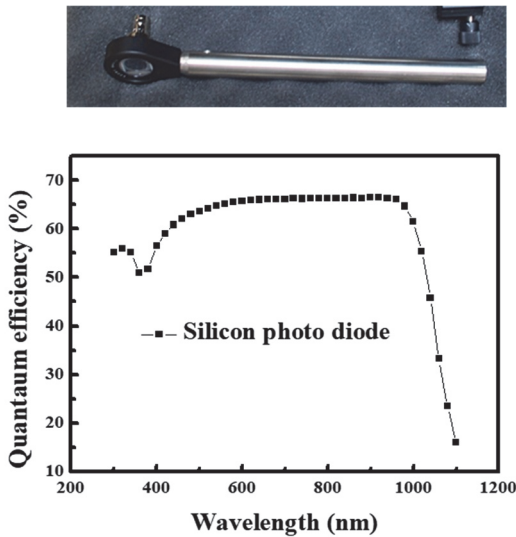


Fig. 10. Reference diode and QE data.

2.2 이론적인 전류밀도 및 QE 측정 데이터

■ 앞서 설명한 바와 같이 QE는 태양전지의 깊이에 따른 특성의 직관을 줄 수 있다. 태양전지 전면의 경우, 표면 도핑, SiN_x 패시베이션 등이 영향을 줄 수 있다. 그림 11은 실리콘 태양전지의 표면 농도에 따른 QE 특성을 보여준다. 표면 반사도가 QE 값에 영향을 줄 경우, 도핑에 따른 특성 분석이 어렵기 때문에 여기서는 IQE를 측정 분석해야 한다. 그림에서 표면 농도가 증가할수록 단파장영역에서 QE가 크게 감소함을 볼 수 있다. 단파장 광은 앞서 설명한 바와 같이 태양전지의 표면에서 거의 흡수되기 때문에 태양전지 표면의 상태를 보여준다. 일반적으로 도핑 농도가 증가할수록 V_{oc}는 증가하지만, 도핑농도가 높을수록 n층(emitter)에서 carrier 농도가 증가하고, 높은 carrier의 농도에서는 carrier 간의 충돌에 의해 carrier의 흐름이 방해 받는다. 이러한

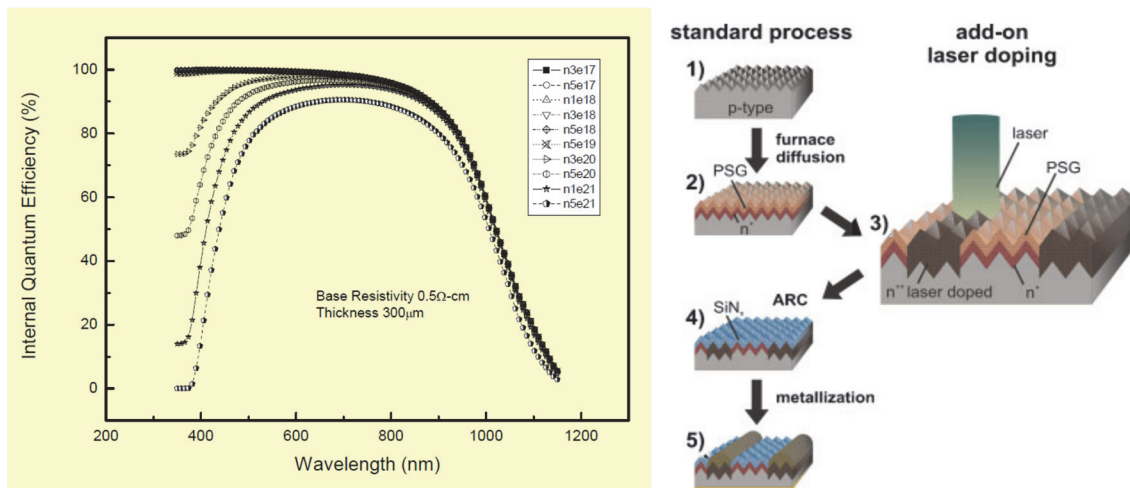


Fig. 11. QE according to surface doping density and selective emitter structure [10].

특성으로 인해 초기 높은 도핑농도(heavy doping, 60~70 Ω/sq)의 태양전지에서 계속해서 낮은 도핑농도 (shallow doping, ~150 Ω/sq)로 변화하였으며, 높은 도핑 농도에서 높은 V_{oc} 특성과 낮은 도핑의 높은 QE 특성을 유지하기 위해 선택적 도핑(selective emitter) 공정이 적용되고 있다. 선택적 도핑 공정은 전면 전극 아래만 높은 농도로 도핑하고, 전극이 없는 부분은 낮은 농도로 도핑을 하는 공정을 말한다 [6]. 선택적 도핑은 diffusion furnace를 통해 약 150 Ω/sq 이상의 낮은 도핑 농도로 도핑을 한 후, 레이저 도핑을 이용해 전극을 형성할 부분만 열을 가하여 높은 도핑 농도층을 형성하는 방법이 이용되고 있다.

- 그림 12는 실리콘 박막 태양전지의 두께에 따른 QE 특성을 보여주는 그래프이다. 실리콘 박막 태양전지의 경우, 높은 흡수계수로 인해 결정질 실리콘 태양전지보다

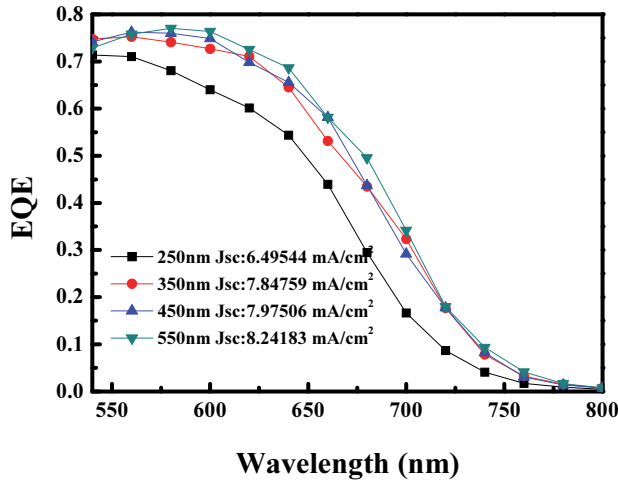


Fig. 12. Long-wavelength QE according to the thickness of silicon thin-film solar cells.

얇은 두께(<1 μm)로도 태양광을 충분히 흡수가 가능하다. 그러나 실제 박막 실리콘 태양전지는 500 nm 이하의 두께에서 높은 효율을 보이는데 이는 박막태양전지는 내부의 높은 결함밀도로 인해 두께가 두꺼워질 경우, carrier의 이동이 어렵기 때문이다.

그림 12에서 두께가 증가함에 따라 장파장 영역에서의 QE 특성이 개선되나, 두께가 350 nm 이상에서는 증가하는 정도가 감소함을 볼 수 있는데, 이는 박막의 높은 결함 밀도에 의한 것으로 볼 수 있다. 그래프에 나타난 전류밀도 값은 약 550 nm에서 800 nm까지의 측정된 QE 값과 앞서 계산된 각 파장에서의 이론적 전류밀도 값을 통해 계산되었다. 이렇게 파장영역을 분할하여 전류밀도를 계산함으로써 두께에 의한 전류밀도 변화를 분석할 수 있다.

- 그림 13은 태양전지 후면의 구조를 변화에 의한 내부 반사 특성의 변화에 따른 QE 특성을 보여준다 [11]. 후면 구조 변화를 통해 내부 반사가 증가하고 이로 인해 투과에 차이를 보인다.

후면에서 웨이퍼로의 내부 반사가 큰(투과도가 낮은) sample B의 경우, ~900 nm까지는 QE 값이 sample A와 비슷한 값을 보인다, 그 이후의 장파장에서 점점 더 QE이 차이가 증가함을 볼 수 있다. 이는 장파장 영역에서의 내부 반사에 의한 광흡수의 증가로 인해 QE가 개선되었음을 의미한다.

- 위에 제시된 예처럼 QE 측정 방법은 QE 데이터와 이론적인 전류밀도 계산과 함께 분석하여, 실험 조건의 가변에 의한 전류밀도의 변화를 특정한 파장영역에서 분석할 수 있는 유용한 측정 방법이다. 이론적인 전류밀도 계산 방법에서 설명하였듯이, 태양전지를 구성하는 여러 박막들(SiN_x, 투명전극, 비정질 실리콘 등)의 반사도, 투과도, 흡수도 등의 측정된 데이터를 이용하여 이

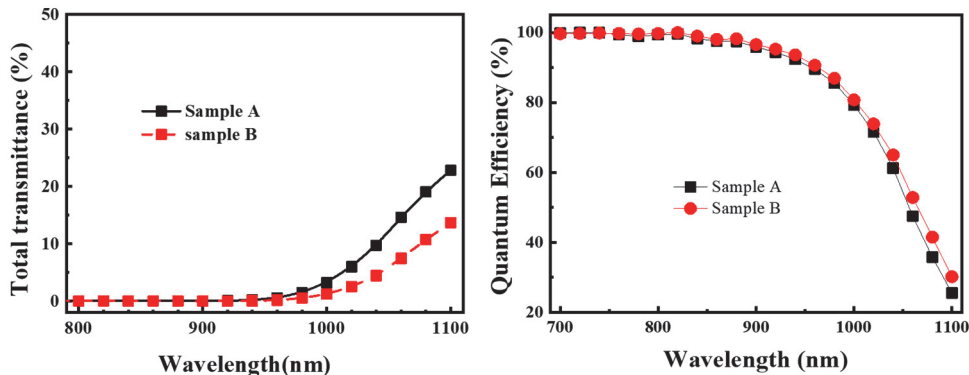


Fig. 13. Transmittance and QE due to difference of internal reflection at rear side.

론적인 전류밀도 계산이 가능하며, 이를 활용하면 태양 전지의 광학적인 loss에 대한 분석이 가능하다 [12,13].

2.3 Tandem 태양전지의 QE 측정

- Tandem 태양전지는 밴드 갭이 다른 두 개 이상의 태양전지를 직렬 연결하여, 상부 태양전지는 단파장(높은 에너지) 광을 흡수하고, 하부 태양전지는 장파장(낮은 에너지) 광을 흡수하여 효율적인 광 흡수로 변환 효율을 극대화하는 태양전지 구조이다. 초기 비정질/미세 결정질 박막 실리콘과 같은 박막 tandem 태양전지가 주로 연구되었으나, 최근에는 결정질 실리콘 태양전지의 효율 한계를 극복하기 위한 방안으로 perovskite/Si tandem, GaAs/Si tandem 태양전지에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 특히 perovskite/Si tandem 태양전지는 국내 최대 태양전지 양산기업인 한화 Q-cell도 양산 적용을 목표로 연구를 추진하고 있는 구조이다.
- Tandem 태양전지(그림 7)는 상, 하부 태양전지가 직렬로 연결되어 있는 구조이다. 상, 하부 태양전지가 각각의 저항의 역할을 하기 때문에 저항체가 직렬로 연결되어 있다고 할 수 있다. 저항의 직렬연결에서 전류는 큰 저항(상, 하부 중 전류 크기가 작은 태양전지)에 의해 제한된다. 따라서 tandem 태양전지에서 상, 하부 태양전지의 전류가 최대의 값을 가지면서 동일한 값을 가지게 하는(전류 매칭, current matching) 것이 매우 중요하다. 전류를 매칭하기 위해서는 tandem 태양전지 제작 후, 상, 하부 태양전지의 정확한 전류 값 측정이 필요한

데 QE 측정을 통해서 가능하다. 상, 하부 태양전지의 전류 mismatch가 있을 경우, 각각의 태양전지의 두께, 밴드 갭 등을 조절하여 광 흡수를 제어하거나 표면, 또는 상, 하부 태양전지의 계면의 구조 등의 변화를 통해 반사, 투과 등을 제어하는 등 다양한 방법으로 상, 하부 태양전지의 전류를 매칭한다.

- 일반적인 실리콘 태양전지의 경우, 300~1,200 nm까지 파장영역에서 측정하지만, tandem 태양전지의 경우, 위에서 설명한 바와 같이 상, 하부 태양전지가 직렬로 연결되어 있기 때문에 각각의 태양전지의 QE를 측정하게 된다. 여기서 주의할 점은 태양전지가 직렬로 연결되어 있기 때문에 상, 하부 태양전지 하나의 QE를 측정할 때는 측정하지 않는 태양전지에 광을 조사하여 태양전지가 최대로 발전(current가 포화되어 최대가 되는, 저항이 최저가 되는 상태)하는 상태로 만들어야 한다. 예를 들어, a-Si:H (Eg=1.7~1.8)/ μ c-Si(Eg=1.12)의 경우, a-Si:H 태양전지의 QE를 측정할 때, μ c-Si 태양전지의 전류가 최대가 되도록 장파장(적색)의 광을 조사하면서 측정해야 한다. Si 태양전지 측정 시에는 반대로 단파장(청색) 광을 조사해야 한다. 일반적으로 백색광과 필터를 이용하여 조사한다. QE를 측정하지 않는 태양전지가 최대전류로 포화되지 않을 경우 측정하지 않는 태양전지의 저항이 증가하여, 전하의 흐름을 방해하여, 왜곡된 QE 값을 갖게 된다.

Triple junction, quadruple junction 태양전지와 같이 태양전지가 3개 이상으로 이루어진 태양전지의 경우, 각각의 태양전지의 정확한 밴드 갭을 알고, 그에 맞는 필터를 통해서 triple junction 경우, 나머지 두 개

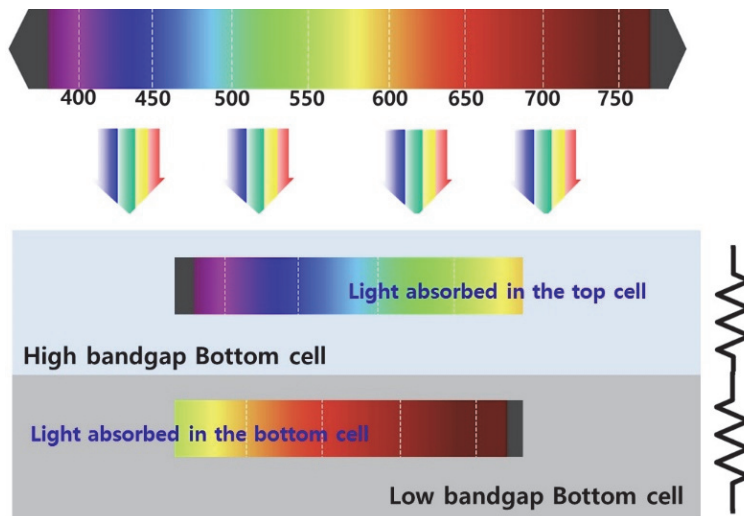


Fig. 14. Tandem solar cell structure and light absorption.

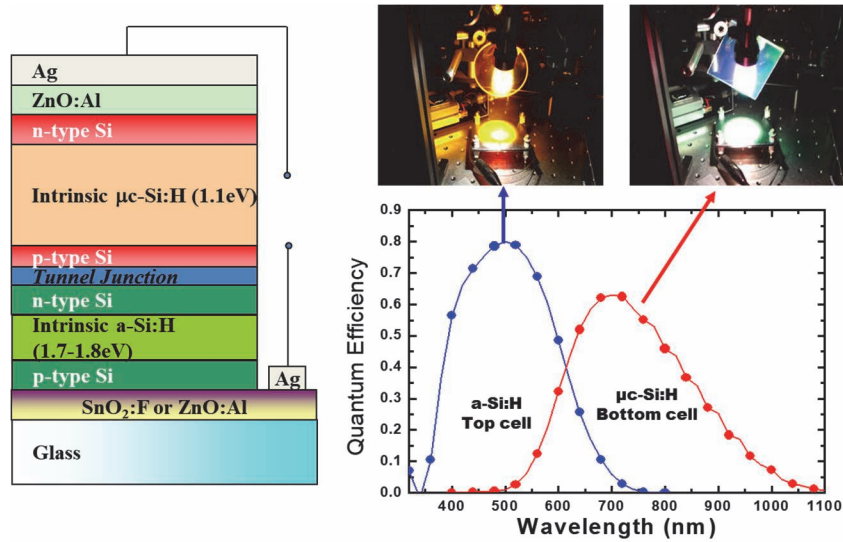


Fig. 15. a-Si:H/ μ c-Si tandem solar cell structure, light irradiation picture and QE data for QE measurement [14].

의 태양전지를, quadruple junction은 나머지 세 개의 태양전지의 전류를 포화시켜 측정해야 한다.

ORCID

Youngkuk Kim
Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-7130-0794>
<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

3. 결론

■ 태양전지를 개발하는 데 있어, 태양광에 의해 생성되는 이론적인 전류밀도 계산을 통해 정확한 값을 알고 있는 것은 매우 중요한 요소이다. 태양전지의 이론적인 전류 밀도를 계산하는 것은 태양전지 개발 과정에서 태양전지의 성능에 대한 직관을 주는 것뿐만 아니라, QE 데이터와 조합 분석을 통해서 태양전지의 전면, bulk, 후면에 관련된 공정을 평가하는 데 활용할 수 있기 때문이다. 특히 태양전지의 구조에서 각 박막의 반사율, 투과율, 흡수율을 측정하고, 이를 이론적인 전류밀도 계산에 적용하여 각 박막에 의한 광 손실에 의해 발생하는 전류 손실을 정확히 계산할 수 있어, 태양전지의 광학적 손실 분석에도 활용이 가능하다.

최근 큰 관심을 모으고 있는 30% 이상의 초고효율 tandem 태양전지는 2개 이상의 태양전지를 직렬로 연결하는 태양전지이다. 따라서 2개 이상의 태양전지의 전류밀도 값을 가장 큰 값으로 매칭하는 것이 매우 중요하기 때문에 각각의 태양전지의 정확한 전류밀도 값을 측정해야 하며, QE 측정을 통해 가능하다. 정확한 QE 측정과 분석에 대한 이해는 초고효율 tandem 태양전지의 개발에 유용하게 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20213030010240, 20203040010320).

REFERENCES

- [1] C. C. Farrell, A. I. Osman, R. Doherty, M. Saad, X. Zhang, A. Murphy, J. Harrison, A.S.M. Vennard, V. Kumaravel, A. H. Al-Muhtaseb, and D. W. Rooney, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **128**, 109911 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>]
- [2] T. Dullweber and J. Schmidt, *IEEE J. Photovoltaics*, **6**, 1366 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2571627>]
- [3] C. Honsberg and S. Bowden, *Quantum Efficiency*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency> (2019).
- [4] C. Honsberg and S. Bowden, *Spectral Response*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response> (2019).
- [5] C. Honsberg and S. Bowden, *Absorption Coefficient*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient> (2019).
- [6] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>

- [7] C. Honsberg and S. Bowden, *Absorption Depth*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-depth> (2019).
- [8] C. Honsberg and S. Bowden, *Standard Solar Spectra*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra> (2019).
- [9] Grid Modernization, Reference Air Mass 1.5 Spectra, <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html> (2019).
- [10] T. C. Röder, S. J. Eisele, P. Grabitz, C. Wagner, G. Kulushich, J. R. Köhler, and J. H. Werner, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, **18**, 505 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.1007>]
- [11] Y. Kim, S. Jung, M. Ju, K. Ryu, J. Park, H. Choi, D. Yang, Y. Lee, and J. Yi, *Sol. Energy*, **85**, 1085 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.001>]
- [12] G. Chen, C. Han, L. Yan, Y. Li, Y. Zhao, and X. Zhang, *J. Semicond.*, **40**, 122701 (2019). [DOI: <http://doi.org/10.1088/1674-4926/40/12/122701>]
- [13] M. Köhler, M. Pomaska, P. Procel, R. Santbergen, A. Zamchiy, B. Macco, A. Lambertz, W. Duan, P. Cao, B. Klingebiel, S. Li, A. Eberst, M. Luysberg, K. Qiu, O. Isabella, F. Finger, T. Kirchartz, U. Rau, and K. Ding, *Nat. Energy*, **6**, 529 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00806-9>]
- [14] J. Lee, *Thesis Ph.D, High Efficiency Multi-Junction Solar Cells Employing Amorphous and Nanocrystalline Silicon Thin-films*, p. 165-166, Sungkyunkwan University, Korea (2008).