

나노구조 소재를 이용한 태양 전지 동향 I

인류의 주요한 에너지원인 석유의 매장량은 한정되어 있다. 따라서 새로운 에너지원의 개발은 매우 중요한 과제이다. 태양광을 전기로 바꾸는 태양전지 (solar cell 혹은 photovoltaic cell)에 대한 연구는 새로운 에너지원 개발 분야에서 많은 관심을 끌고 있다. 기존의 태양전지에 대한 연구는 LED와 마찬가지로 2차원 반도체 박막을 이용한 연구가 주요 관심사였다. 하지만 나노구조 소재의 개발과 함께 이를 이용한 태양전지 응용이 최근 많은 관심을 끌고 있다. 본 연재에서는 태양전지의 원리, 개념, 관련 지식, 현재 태양전지의 성능 및 사용 물질, 광 변환 효율에 대해서 소개하고자 한다. 이를 통해서 나노구조 소재를 이용한 태양전지의 가능성 및 연구 방향을 확인하고자 한다.

1. 태양광의 특성

태양은 표면온도가 5762 K이므로 태양광의 spectrum은 이 온도에 준하는 흑체복사로 표현될 수 있다. 태양으로부터 방출된 빛을 대기권 밖에서 입사광에 수직으로 측정하면 태양상수 혹은 Air Mass zero (AM0)로 불리우는 일정한 값을 얻게 된다. 일반적으로 널리 알려진 AM0의 값은 1.353 kW/m^2 이다. 그러나 태양광이 지표면에 도달하게 되면 spectral distribution은 상당히 감소하게 된다. 이러한 감소의 주요한 원인은 각종 분자, 먼지에 의한 산란, 수증기, 오존, 이산화탄소에 의한 흡수이다. 이러한 감소는 파장에 따라서 달라지며 지구 대기권을 통과하는 경로에 따라서 달라진다. 이를 정량화한 것이 Air Mass number 이다. (AM m)이다. 그림2와 같이 태양광의 입사각이 ϕ 일때 AM m 은 $\cos(\phi)$ 의 역수에 비례한다. 예로 지표에 수직으로 입사하는 태양광은 AM1 이다. [1-3]

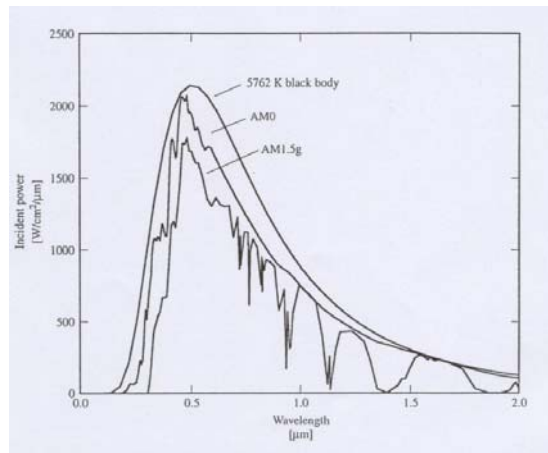
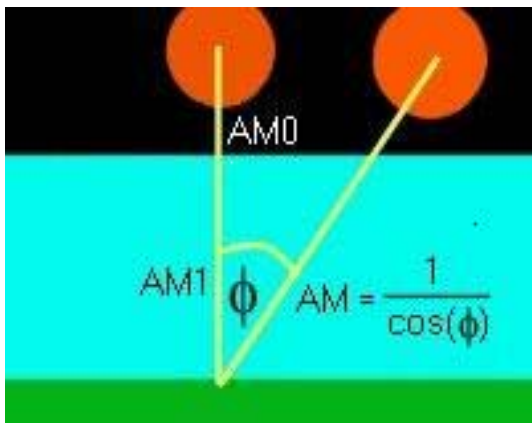


그림1 (좌) Air Mass number 결정 방식 (우) AM0, AM1.5, 5762 K 흑체복사 spectral distribution 비교 [2,3]

그림1의 우측 그래프는 AM0, AM1.5, 흑체복사에 대한 spectral distribution을 비교하였다. AM0에 비해서 AM1.5는 특정 파장의 power가 매우 약한데 이는 특정 물질(수증기, 이산화탄소, 오존 등)에 의한 산란, 흡수에 기인한 것으로 판단된다.

Air Mass number는 또한 주변환경의 영향까지 고려하여서 세분화 할 수 있다. AM1.5g (global)의 경우 주변환경에 의한 반사, 재방출된 빛까지 고려한 강도를 의미하며 AM1.5d (direct)의 경우 직접 입사된 빛만을 고려한 것이다. 일반적으로 태양전지의 효율을 측정하는 조건은 1.0 kW/m^2 인 AM1.5g 이다.

2. 태양전지의 작동 원리

태양광이 전달한 에너지는 p-n junction에서 그림2(좌)와 같이 전자와 정공을 생성하게 된다. Conduction band로 전이된 전자는 n형 반도체 쪽으로 흘러가며 valence band쪽으로 전이된 정공은 p형 반도체 쪽으로 흘러가면서 전류가 생성된다. 그림2(우)는 태양광에서 받은 에너지가 전류로 생성되지 못하고 손실되는 원인을 구분하여서 나타냈다. ①과 같이 band gap 보다 매우 큰 에너지로 전이될 경우 band gap 을 초과하는 에너지는 반도체 격자를 진동 시키는 열로 손실되며 ②, ③과 같이 junction, 전극-접촉에 의해 전압이 손실되며, ④와 같은 전자와 정공이 재결합하게 되면 태양광에 의해서 생성된 전류가 손실된다. 태양전지의 원리 및 에너지 손실 원인을 잘 이해한다면 효율적인 태양전지 제작이 가능할 것이다.

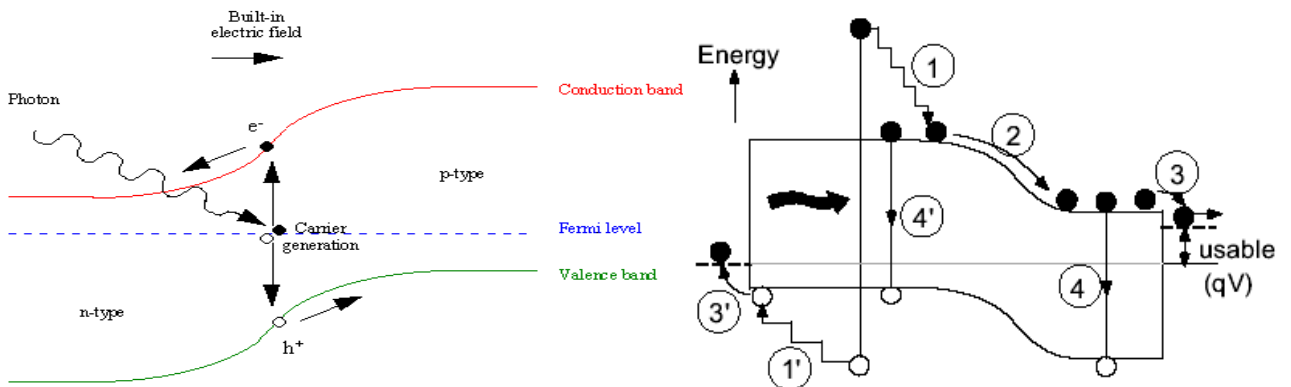


그림2 p-n junction 반도체에 의한 태양전지의 동작 원리 및 에너지 손실 원인

태양전지의 특성을 나타내는 척도로서 open circuit voltage (V_{oc}), short circuit current (I_{sc}), fill factor (FF) 등이 사용된다. 태양전지의 회로 model인 그림 3(좌)에서 V_{oc} 는 전류 $I = 0$ 일때 나타나는 전압을 의미한다. 회로 단자의 +, -를 short 시키면, 즉 전압을 0으로 하면, recombination에 해당하는 diode에는 전류가 매우 적게 흐를 것이므로 측정된 전류 I 는 I_{sc} 로 나타낼 수 있다. 주어진 태양전지

에서 전압에 따른 생성전류의 관계를 나타낸 것이 그림3(우)이며 최대 power를 얻기 위해서는 V_{MP} , I_{MP} 에서 태양전지를 동작시켜야 한다.

FF 는 그림3(좌)의 V_{OC} , I_{SC} 에서 얻을 수 있는 파란색 사각형에 대해서 최대로 얻을 수 있는 maximum power (빨간색 사각형)의 비율을 나타낸 것이다.

$$FF = P_{MP} / (V_{OC} * I_{SC}) = (V_{MP} * I_{MP}) / (V_{OC} * I_{SC})$$

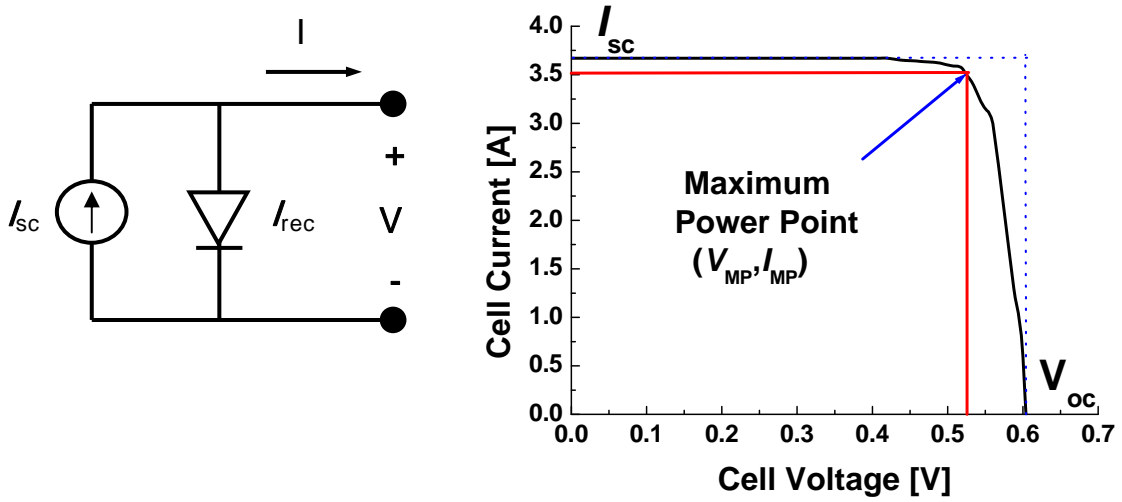


그림3 (좌) 태양전지의 회로 model, (우) 실리콘 태양전지의 전류-전압 특성도

태양전지의 성능을 표현할 때 가장 중요하게 여기는 것이 광에너지 변환효율, η , 이다. 다음의 식과 같으며 P_{in} 은 AM0 (1.353 kW/m²), AM1.5g (1.0 kW/m²)와 같이 태양전지에 입사되는 광의 특성에 의해 결정된다.

$$\eta = P_{MP} / P_{in} = (V_{MP} * I_{MP} / P_{in}) = (FF * V_{OC} * I_{SC}) / P_{in}$$

태양전지는 V_{OC} , I_{SC} 가 가능한 크며 FF 가 1에 가깝고 η 가 클수록 이상적이다.

3. 기존 태양전지의 특성 및 현재 수준

본 절에서는 현재 시장을 형성하고 있는 crystalline silicon 태양전지부터 실험실 수준에서 가장 높은 효율을 나타내는 multi-junction 태양전지까지 다양한 종류의 태양전지에 대한 특성 및 기술 수준을 소개하고자 한다. [4]

- 결정형 실리콘 태양전지

기존의 반도체 기술을 이용하여서 150 ~ 300 μm 두께의 결정형 실리콘으로 이루어진 wafer를 서로 연결하고 유리판 사이에 넣어서 module을 형성한다. 상당

부분 성숙된 기술로써 태양전지 시장의 약 90%를 현재 차지하고 있다. 비용에 대부분은 결정형 실리콘 wafer가 차지하고 있다. 광-변환효율은 이론적으로는 25% 이상이지만 실제 module화 시킨 후의 효율은 13 ~ 16% 수준이다. Module의 효율 향상을 통해서 2010년까지는 태양전지에 의한 전력생산비용을 7 ϕ /kWh 이하로 낮추려는 노력을 진행 중이다. 단기적으로는 유용하지만 장기적인 관점에서는 생산원가 감소 및 효율향상에 한계가 있다.

- 박막형 태양전지

결정형 실리콘이 두께 150 μm 이상의 막을 사용한다면 박막형 태양전지는 두께 1 ~ 10 μm 인 반도체 박막을 사용한다. 따라서 결정형 실리콘에 비해서 매우 적은 양의 반도체를 사용하며 넓은 면적의 device를 대량으로 생산할 수 있다. 박막형 전지는 사용되는 물질에 따라서 amorphous silicon (*a*-Si), copper indium diselenide (CIS), cadmium telluride (CdTe) 분류할 수 있다. *a*-Si은 1980년대부터 이미 시장을 형성했다. 나머지 두 종류는 시장에서 상대적으로 새롭게 등장하고 있는 추세이다. 현재 상업용 박막 태양전지 module의 효율은 사용물질, device 구조에 따라서 5 ~ 11% 수준이며 결정형 실리콘과 가격면에서 경쟁하고 있다. 하지만 앞으로 시장점유율이 증가될 것으로 예측된다. 여러 가지 물질들이 복합막으로 형성된 multi-junction module의 경우 15% 이상의 광-변환효율을 나타내고 있다. 개선된 대량생산 기술과 이러한 효율 향상 기술이 결합된다면 전력생산 비용은 4 ϕ /kWh 이하로 낮출 수 있을 것으로 예상된다. 이는 기존 전력생산비용과 동등한 수준이므로 태양전지의 대량 보급이 가능할 것으로 판단된다.

- Multi-junction 태양전지

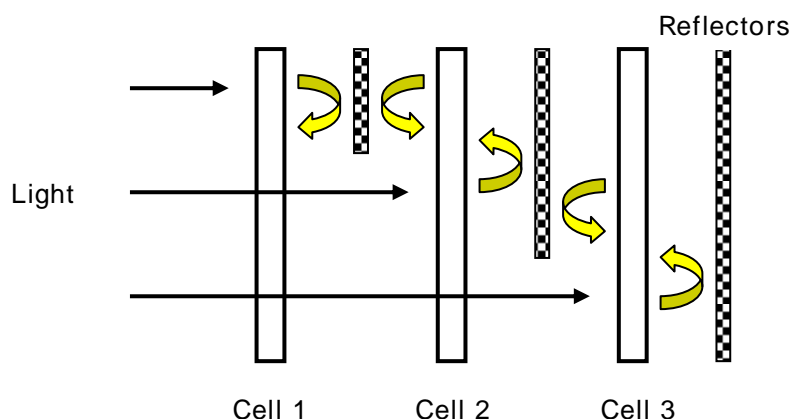


그림4 Multi-junction 태양전지의 개념도

Single layer 태양전지의 단점은 주어진 반도체 물질의 band gap (E_g) 보다

매우 큰 에너지 (E)가 공급되면 그 에너지 차이만큼은 ($E-E_g$) 전력으로 변환되지 못하고 열이나 다른 형태의 에너지로 소모된다는 단점이 있다. 따라서 단결정 Si ($E_g = 1.17 \text{ eV}$)의 경우 이론적인 최고 효율은 33% 이하일 것으로 예측되며 실제 cell 효율도 25% 수준이다. 하지만 그림4와 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 band gap이 감소하는 ($E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$) 태양전지 stack 을 형성한다면 왼쪽 cell부터 짧은 파장의 빛을 흡수하므로 각 cell에 대해서 band gap을 초과하는 에너지의 공급을 최소화 하므로 전체 태양전지의 효율을 높일 수 있다. [5] 이미 박막형 태양전지에서도 소개한 개념이지만 여기에 사용되는 물질이 고효율인 III-V족 (ex, GaAs, InP, GaInP 등)이라는 점에서 차이가 있다. 실제로 GaInP/GaAs/Ge 3개층으로 이루어진 태양전지의 경우 최고 37%의 효율을 기록한 것으로 보고되었다. [6] 이러한 방식에서는 전형적으로 광학 렌즈로 작은 면적의 cell에 집중시킨 태양광에너지를 사용한다. 지금까지 소개된 태양전지들의 특성은 표1로 요약하였다. [7]

표 1. 각종 cell, module에서의 태양전지 효율 (25°C, AM1.5g spectrum (1000 W/m²)에서 측정) [7]

Classification	Efficiency (%)	Area (cm ²)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	Test Center (and date)
<i>Silicon cells</i>						
Si (결정성)	24.7	4.00	0.706	42.2	82.8	Sandia (99.3)
Si (thin film transfer)	16.6	4.017	0.645	32.8	78.2	FhG-ISE(01.7)
<i>Amorphoous/nanocrystalline Si</i>						
Si (nanocrystalline)	10.1	1.199	0.539	24.4	76.6	JQA (97.12)
<i>III-V cells</i>						
GaAs (결정성)	25.1	3.91	1.022	28.2	87.1	NREL (90.3)
GaAs (박막)	23.3	4.00	1.011	27.6	83.8	NREL (90.4)
GaAs (결정성)	25.1	3.91	1.022	28.2	87.1	NREL (90.3)
InP (결정성)	21.9	4.02	0.878	29.3	85.4	NREL (90.4)
<i>Polycrystalline 박막</i>						
CIGS (cell)	18.4	1.04	0.669	35.7	77.0	NREL(01.2)
CIGS (submodule)	16.6	16.0	2.643	8.35	75.1	NREL (90.3)
CdTe (cell)	16.5	1.032	0.845	25.9	75.5	NREL (01.9)
<i>Multi-junction cells</i>						
GaInP/GaAS	30.3	4.0	2.488	14.22	85.6	JQA(96.4)
GaInP/GaAS/Ge	32.0	3.989	2.622	14.37	85.0	NREL (03.1)
GaAS/CIS (박막)	25.8	4.00				NREL (89/11)
a-Si/CIGS (박막)	14.6	2.40				NREL (88/6)

CIGS=CuInGaSe₂, CIS=CuInSe₂

4. 나노구조 소재를 이용한 태양전지의 가능성

나노구조 소재를 사용한 태양전지 응용은 최근 많은 관심을 끌고 있다. 그 주된 이유는 태양전지 제작자들이 나노구조 반도체들의 size를 조절하면 band gap을 조절할 수 있기 때문이다. 그림5은 나노구조 소재를 이용한 태양전지의 개념도로서 위에서 아래로 갈수록 나노구조 소재의 크기를 증가시키면 해당 band gap이 감소한다. 이는 cell 상단에서는 진동수가 큰 빛만 흡수되고 나머지 진동수가 작은 빛은 통과하므로 진동수가 작은 빛은 하단까지 도달해서 해당 band gap을 갖는 나노구조 소재에 흡수될 수 있다는 의미이다. 따라서 나노구조 소재의 크기 및 배열을 태양광의 특성에 따라서 적절히 조절한다면 multi-junction 태양전지의 효율인 37%를 능가하는 효율을 얻을 수 있을 것이다. 이론적인 quantum dot의 크기를 연속적으로 조절하면서 최적화 할 경우 최고 86.5%까지 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예측하였다. [8]

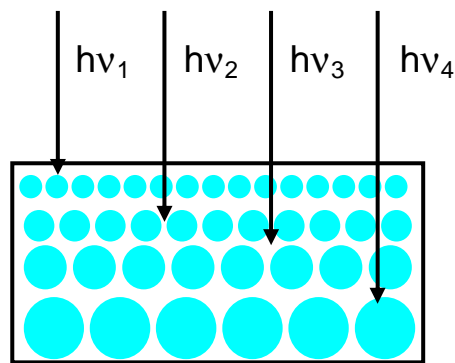


그림 5 Quantum dot을 이용한 태양전지 개념도: size작은 quantum dot부터 위에서 아래로 차례로 배치하면 진동수가 큰, 에너지가 높은 빛부터 차례로 흡수되므로 진동수가 작은 빛이 아래까지 도달 가능하다. ($v_1 > v_2 > v_3 > v_4$)

5. 참고문헌

- [1] "Terrestrial Photovoltaic measurement Procedures", ERDA/NASA Report 1022-77/16 (1997)
- [2] J. S. Ayubi-Moak, *Internal Report*, Arizona State University, Tempe, Arizona, 2004
- [3] <http://rredc.nrel.gov/solar/>
- [4] "Switching on the Sun", NREL/JA-810-31967, page 14, (2002)
- [5] A. Luque and A. Marti, In book of "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering part I", chap. 4, 133 (2002)
- [6] R. R. King *et al.*, 3rd World Conferenc on Photovoltaic Energy Conversion, 622, (2003)
- [7] M. A. Green, *et al.*, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **11**, 347 (2003)
- [8] S. Bailey and R. Raffaeille, In book of "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering part I", chap. 10, 416 (2002)