

미래에너지특론

태양전지 동작 (cell operation)

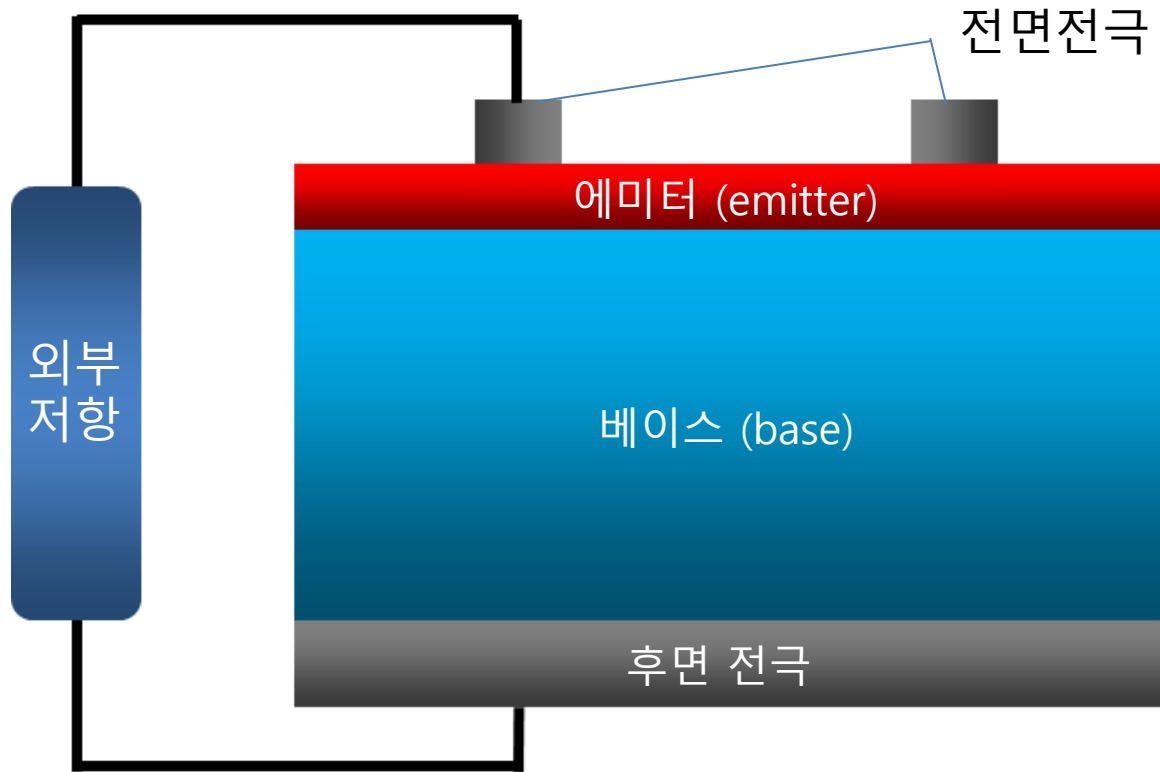
한국기술교육대학교

에너지신소재화학공학부

나 윤 채

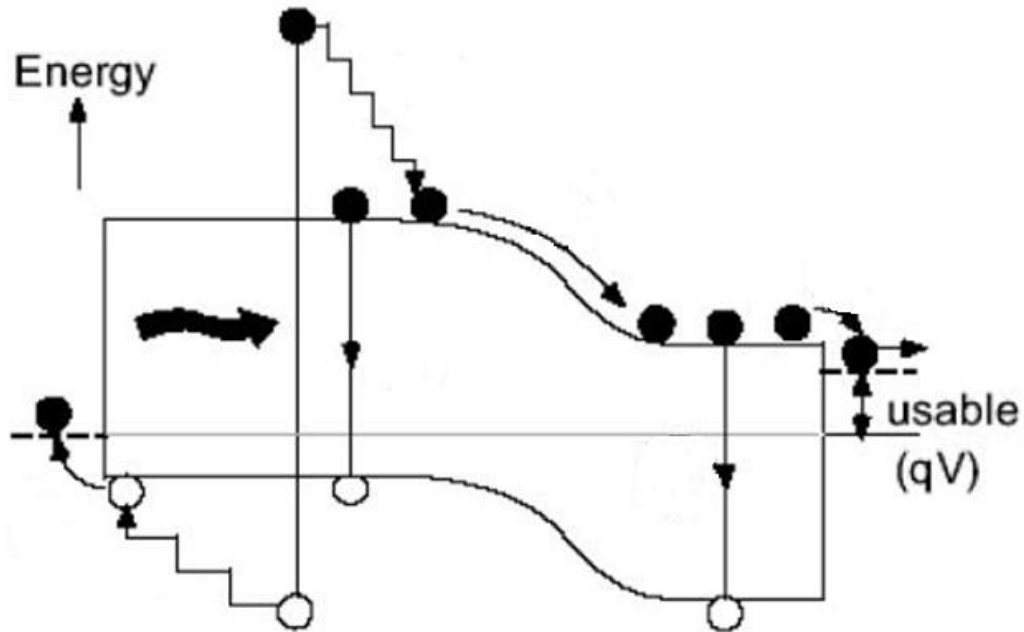
태양전지 작동 원리

- 태양전지의 구조



태양전지 작동 원리

- 1) 빛을 흡수: 전자와 정공 생성 (generation)
- 2) 전자와 정공의 분리 (charge separation)
- 3) 전자와 정공의 수집 (collection): 전압과 전류 생성
- 4) 부하와 기생적인 저항에 의해서 출력의 손실



광 생성 전류

- 전류의 생성 프로세스

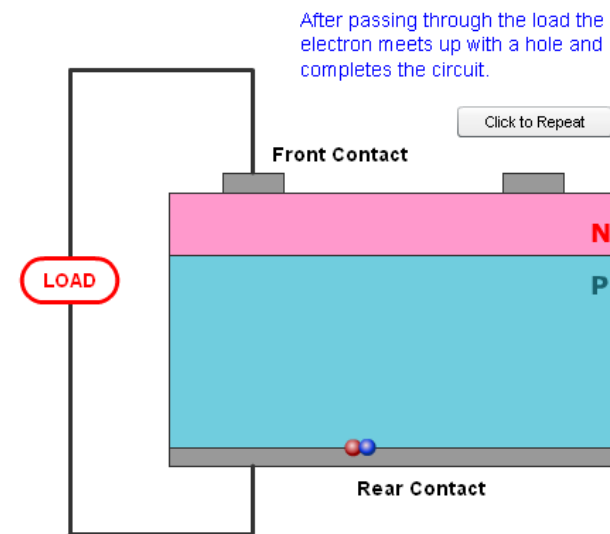
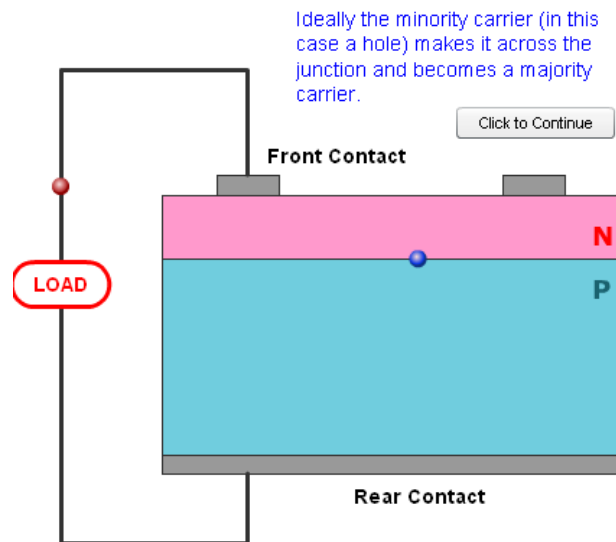
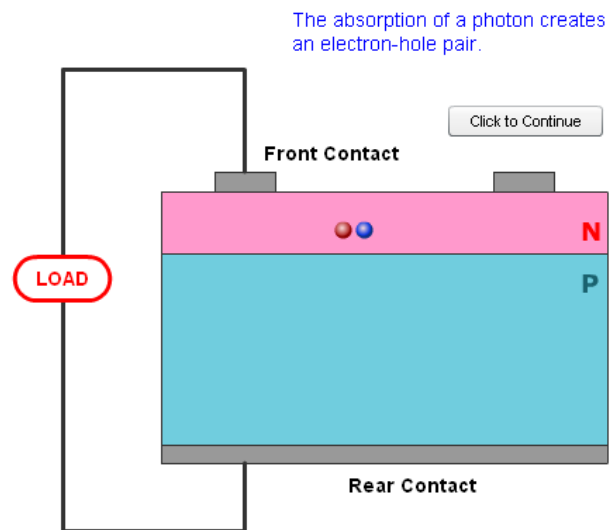
1) 입사되는 광자 (photon)을 흡수하여 전자-정공 쌍을 만든다.

- $E_{\text{photon}} > E_g$: 태양전지 내에 전자-정공 쌍 생성
- 재결합하기 까지 준안정상태 (meta-stable state)로 존재
- 재결합 후 전자-정공 쌍은 소실되고 전류나 출력은 생성되지 않는다.

2) pn 접합에 의한 캐리어의 수집 (collection)

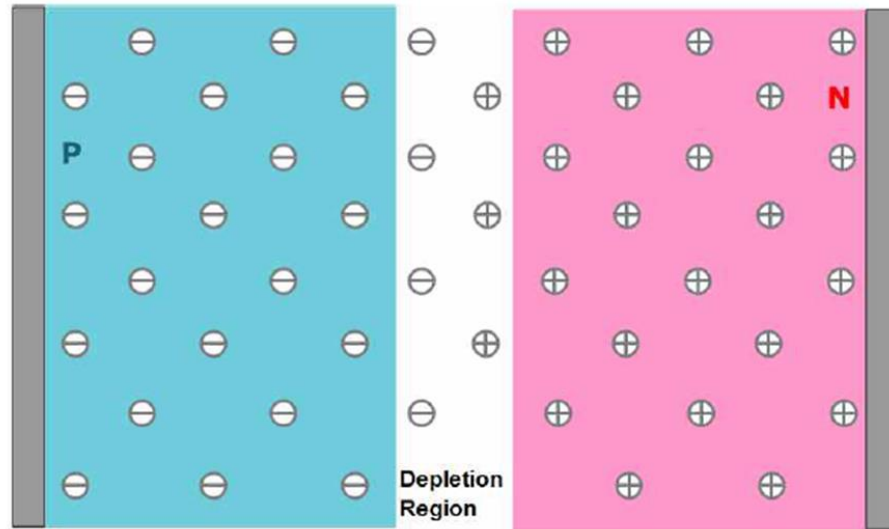
- pn 접합을 이용하여 재결합을 방지 (전기장에 의해 캐리어 분리)
- 소수 캐리어 → 다수 캐리어로 전환

광 생성 전류



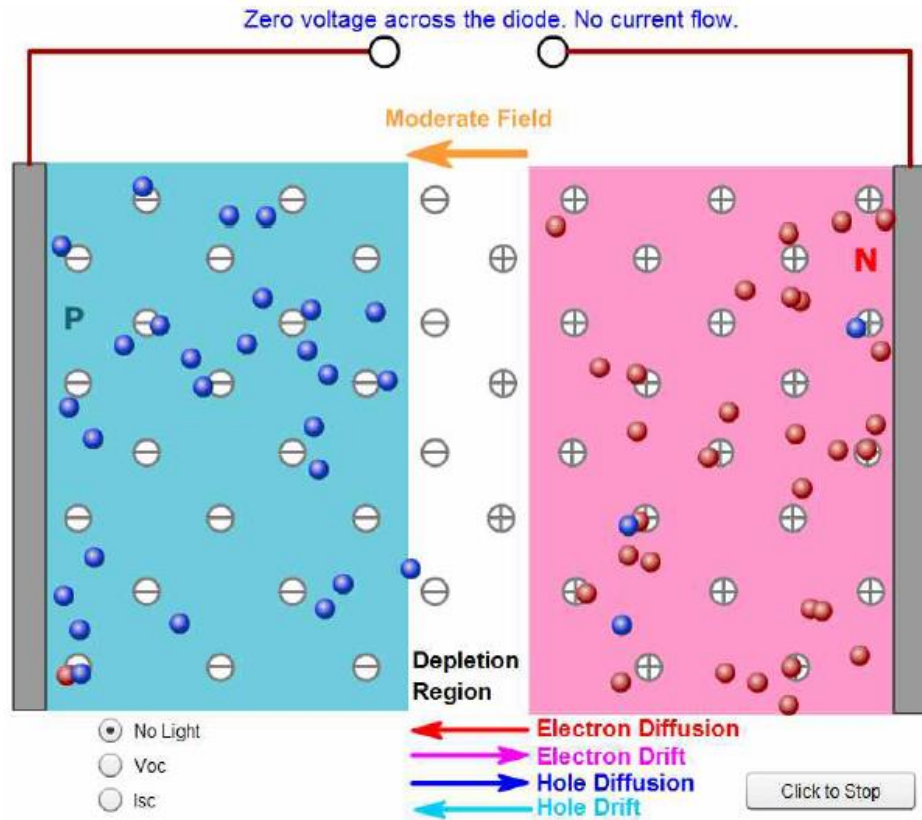
광기전력 효과 (photovoltaic effect)

- 광기전력 효과: 빛에 의해 생성된 캐리어의 밀도 차이에 의해 기전력 발생
 - 전자는 n 형 쪽으로, 정공은 p형 쪽으로 이동
 - 캐리어들이 축적되면 기전력이 발생
 - 공핍층의 전기장을 감소시킴 (순방향) → 확산 전류 증가됨.

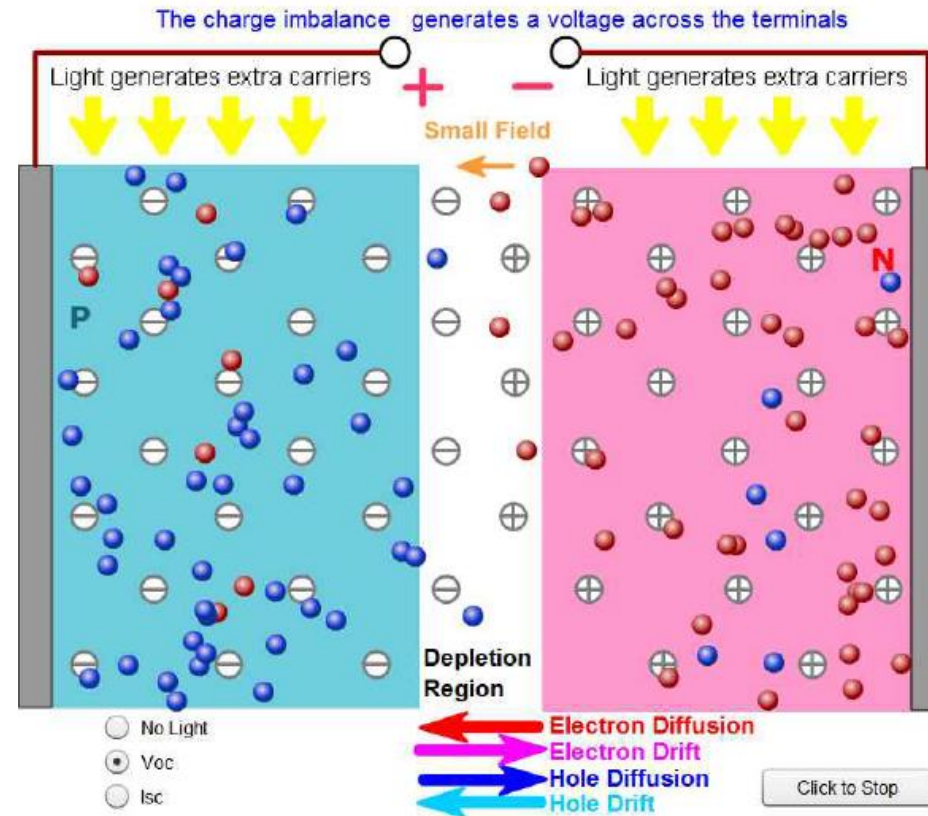


태양전지의 평형, 단락회로, 개방전압 조건하에서의 캐리어 흐름의 모사. 점합을 건너는 전류들의 크기가 다른 점을 주목하세요. 평형(즉 암상태)에서 확산전류와 표류전류 둘 다는 모두 작다. 단락회로 조건하에서, 점합의 어느 쪽이든 소수 캐리어 농도가 증가하고 그리고 소수 캐리어의 개수에 의존하는 표류전류가 증가한다. 개방회로 조건하에서는 광생성 캐리어들이 점합에 순방향 바이어스가 걸리게 만드는데, 그로 인해 확산전류가 증가한다. 확산과 표류전류는 방향이 반대이므로 개방회로에서 태양전지로부터의 net 전류는 없다.

광기전력 효과 (photovoltaic effect)

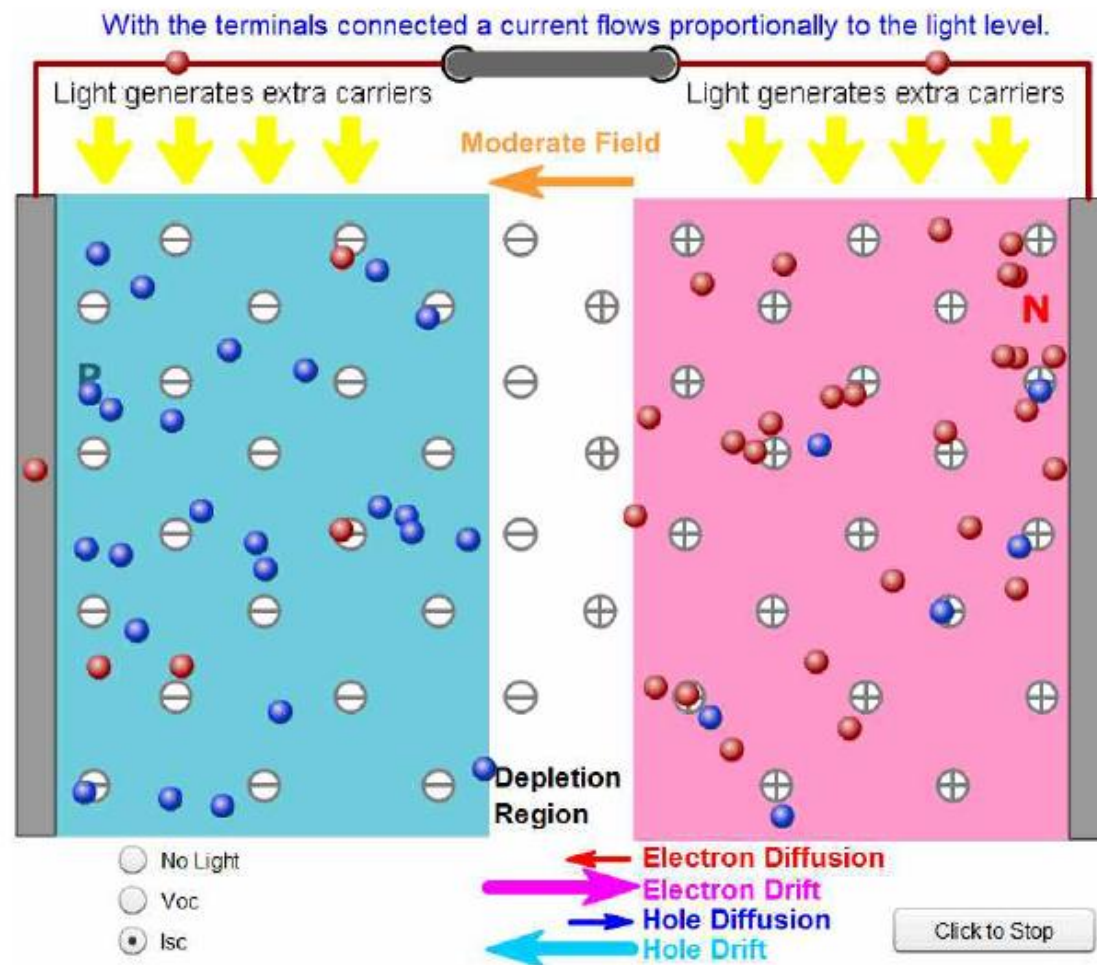


1) No light : 다이오드에 걸린 전압은 제로. 전류가 흐르지 않음.



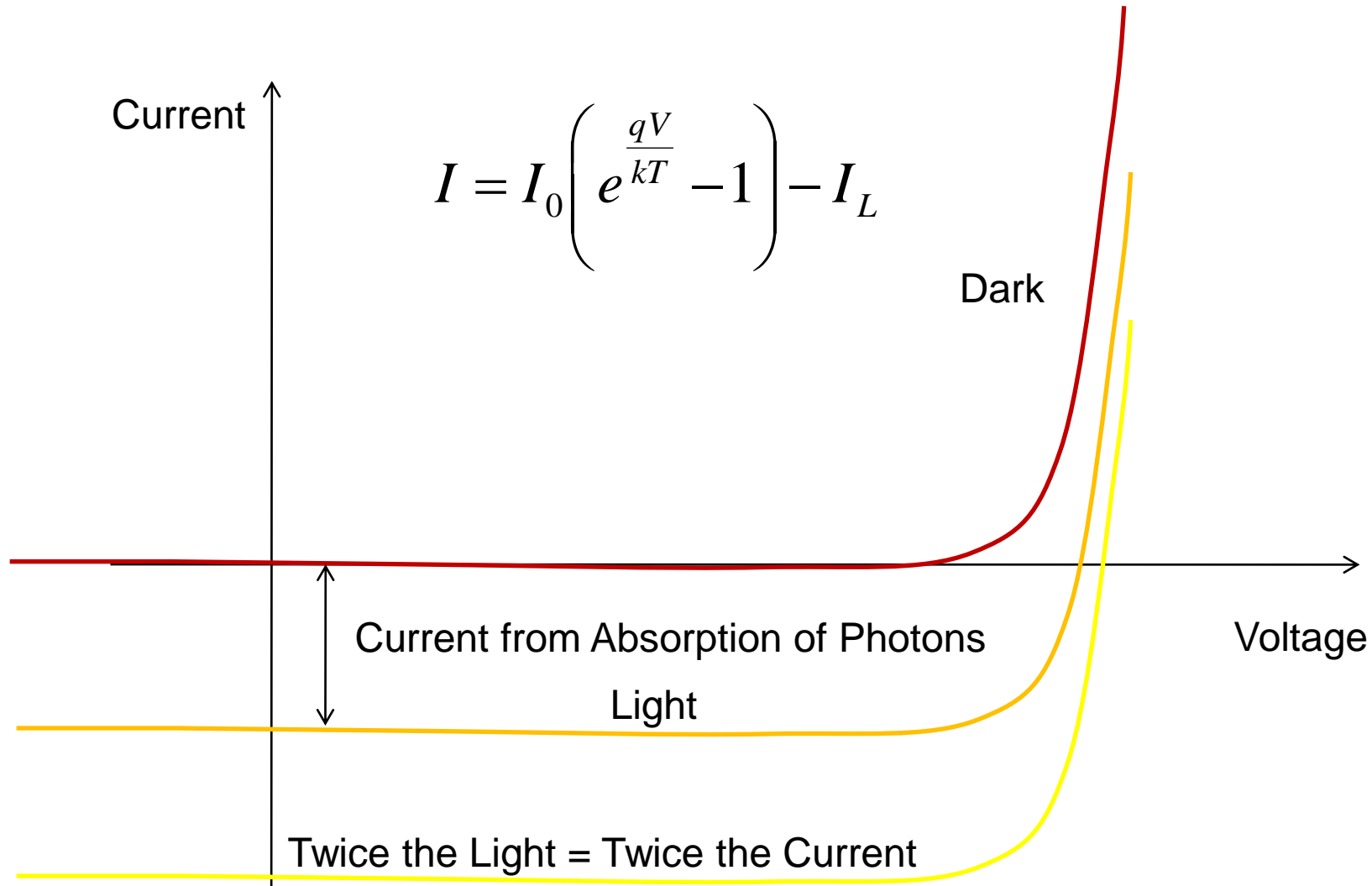
2) Voc : 빛에 의해 여분의 캐리어들이 생성된다. 전하의 불균형이 외부 단자에 걸쳐 전압을 생성한다.

광기전력 효과 (photovoltaic effect)



3) I_{sc} : 단자들이 연결되면 빛의 세기에 비례하여 전류가 흐른다.

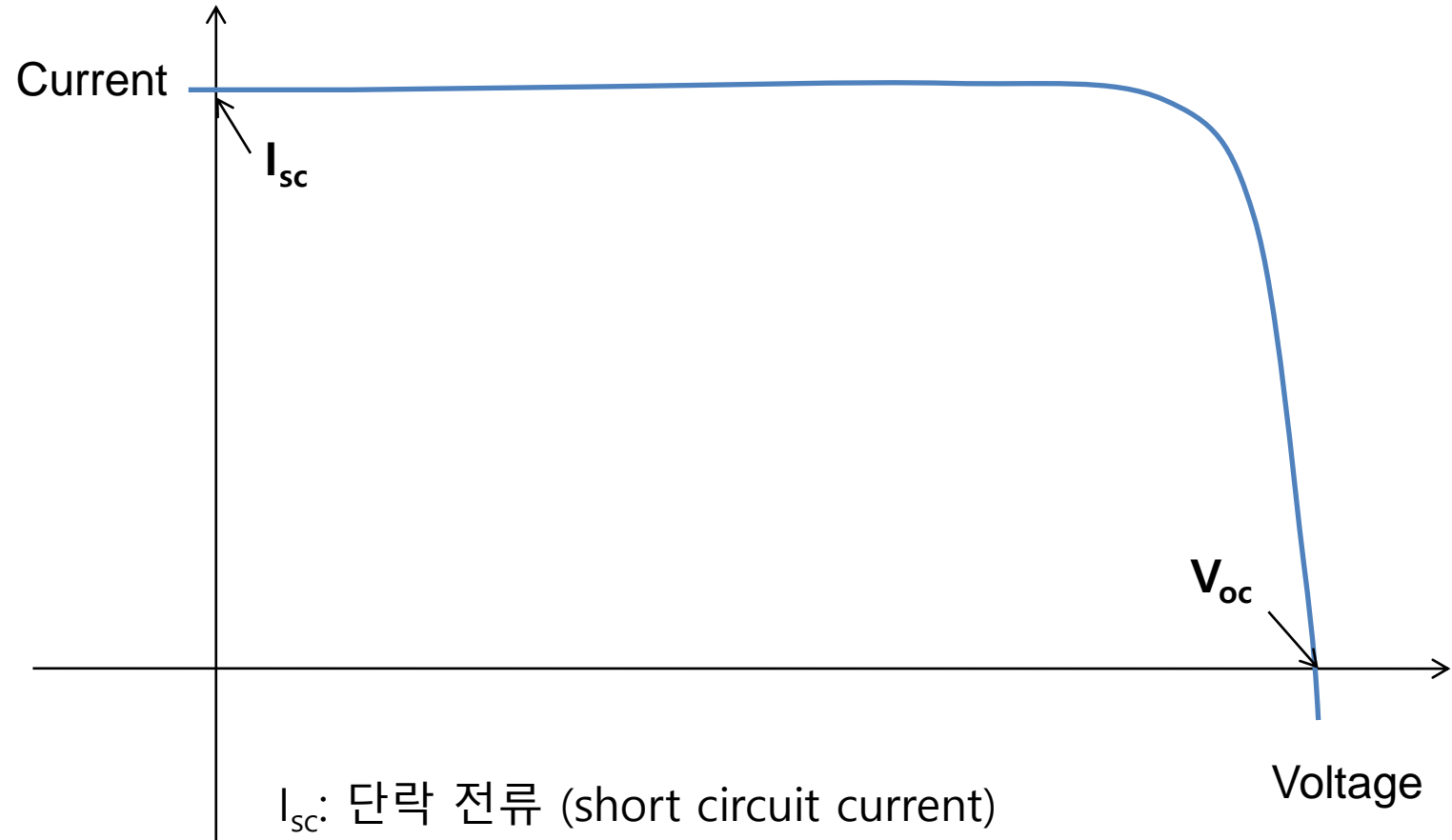
태양전지의 I-V 특성



태양전지의 I-V 특성

- 태양전지 성능 인자

- (1) 단락 전류
- (2) 개방 전압
- (3) 곡선 인자



I_{sc} : 단락 전류 (short circuit current)

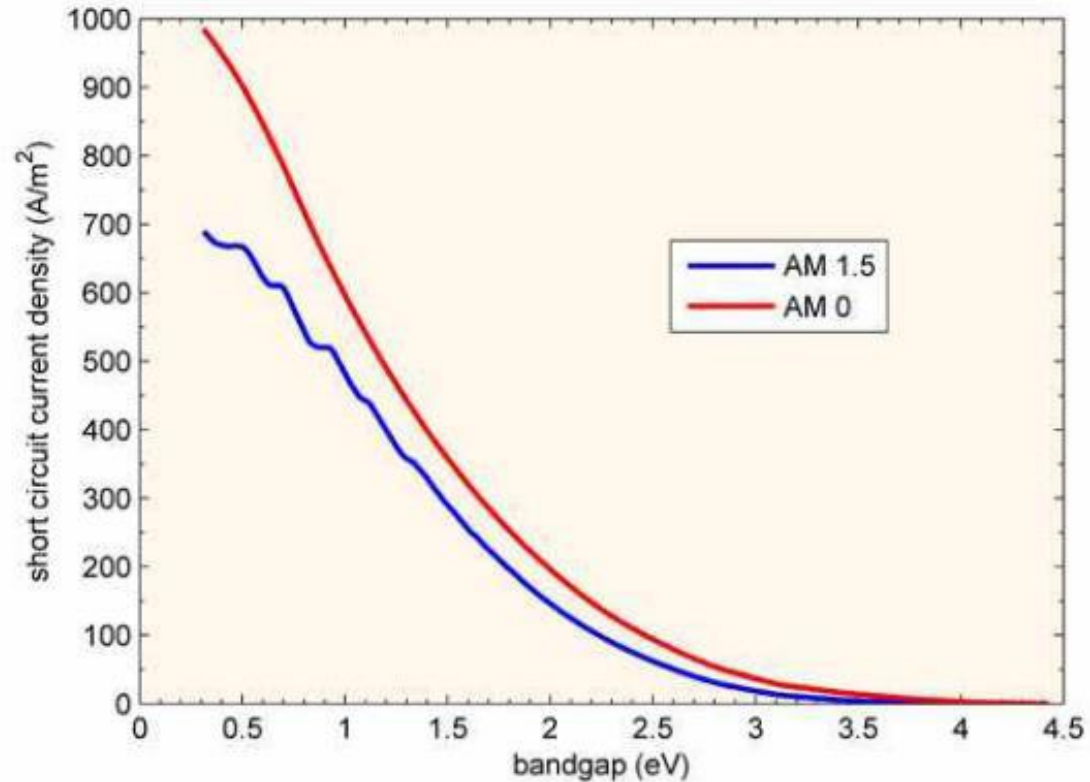
V_{oc} : 개방 전압 (open circuit voltage)

단락 전류 (short-circuit current)

- 단락 전류: 태양전지에 걸려 있는 전압이 0일 때 즉, 태양전지가 단락회로 일 때, 태양전지에 흐르는 전류
 - 광생성 캐리어의 생성과 수집에 기인함.
 - 태양전지로부터 끌어낼 수 있는 최대 전류
- 단락 전류를 결정하는 요인들
 - 태양전지의 면적: 면적 의존성을 제거하기 위해 전류 밀도 (J_{sc} : mA/cm²)를 쓴다.
 - 입자광원의 출력 (입사광자의 개수): 빛 세기에 의존한다.
 - 입사광의 스펙트럼: 대부분 태양전지 측정의 경우 AM 1.5를 표준으로 한다.
 - 태양전지의 광학적 특성: 흡수와 반사 특성
 - 태양전지의 수집 확률: 표면 부동태화, 캐리어의 수명

단락 전류 (short-circuit current)

- 밴드갭과 단락전류와의 관계

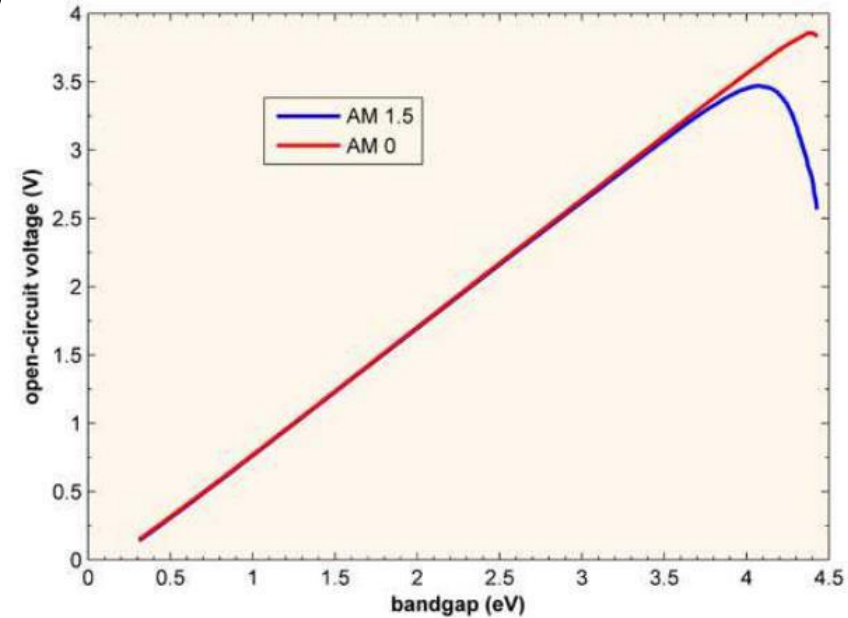


이상적인 태양전지에서 밴드갭 이상의 에너지를 가진 광자는 외부회로에 하나의 전하 캐리어를 공급하는데, 밴드갭이 가장 낮을 때 전류가 최고가 된다.

개방 전압 (open-circuit voltage)

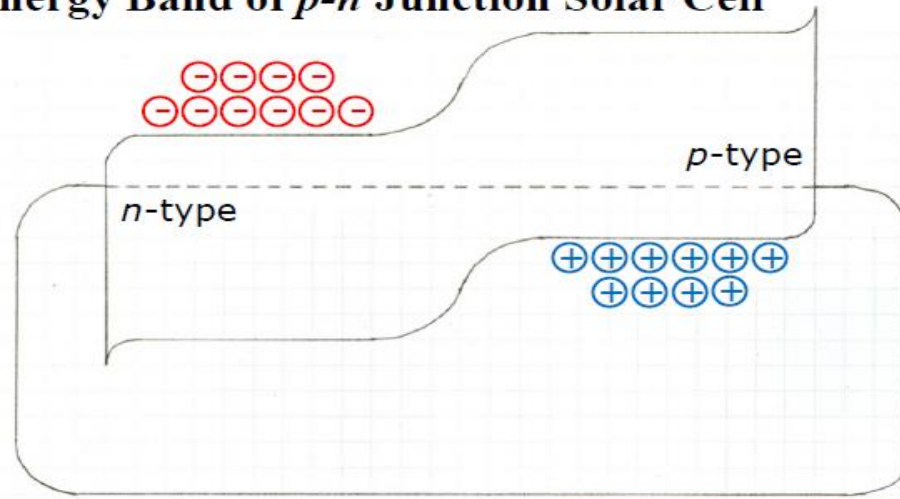
- 개방 전압: 태양전지로부터 얻을 수 있는 최대 전압
전류가 0일 때의 전압

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad \text{로 부터} \quad , \quad V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$



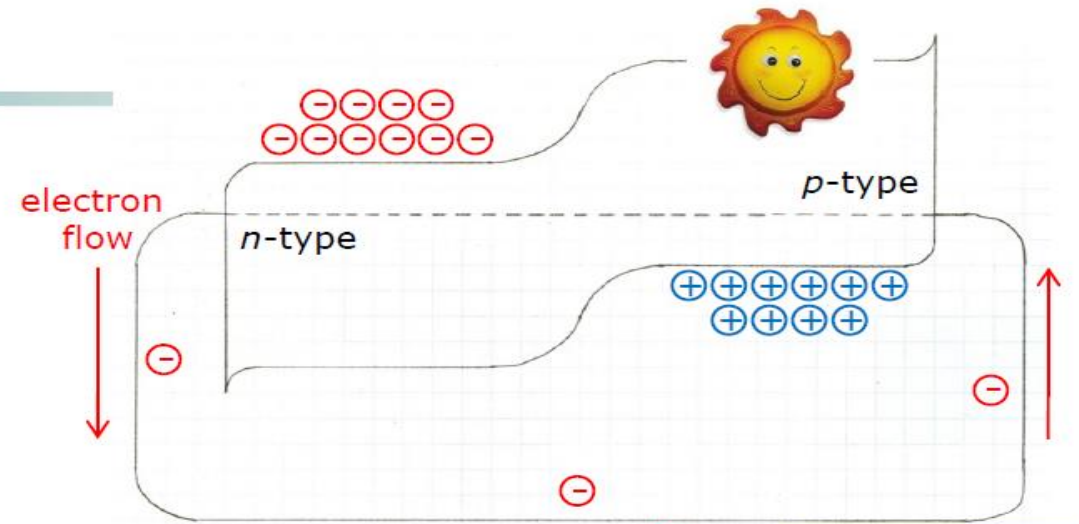
AM 0와 AM 1.5 조건에서 태양전지의 밴드갭에 따른 V_{oc} . 재결합 전류가 떨어지기 때문에 V_{oc} 는 밴드갭과 함께 증가한다. 밴드갭이 매우 높을 때는, I_{sc} 가 매우 낮기 때문에 V_{oc} 의 급강하가 생긴다.

Energy Band of *p-n* Junction Solar Cell

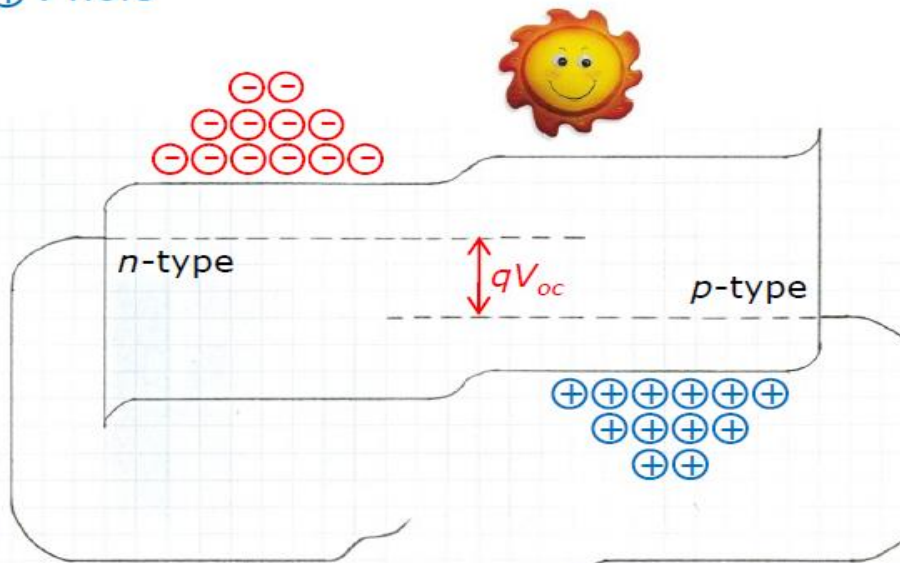


⊖ : electron
⊕ : hole

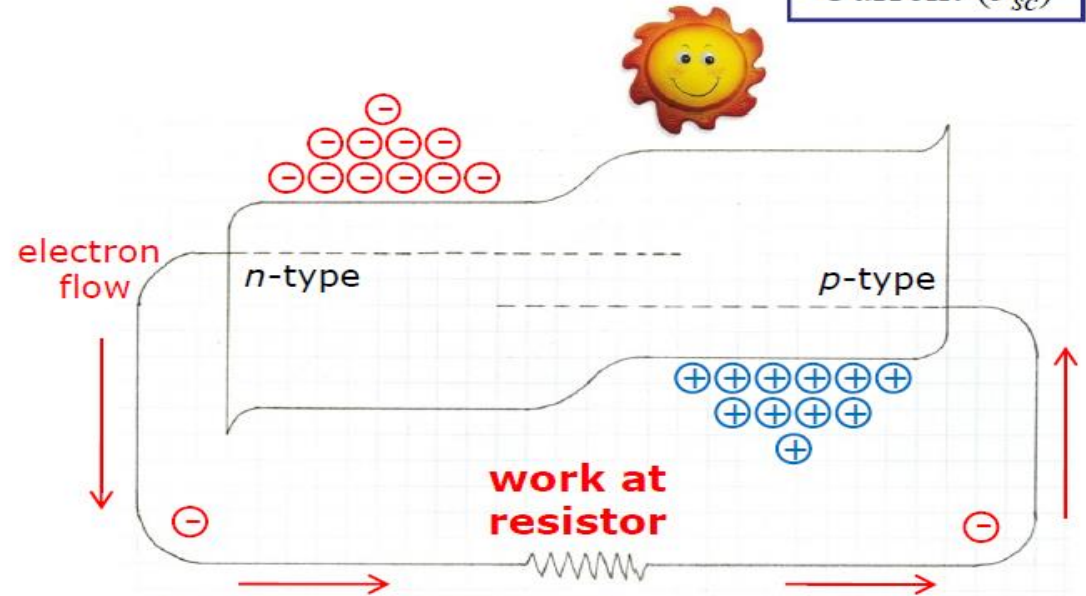
Dark Flux & 0 V



Short-Circuit Current (J_{sc})



Open-Circuit Voltage (V_{oc})

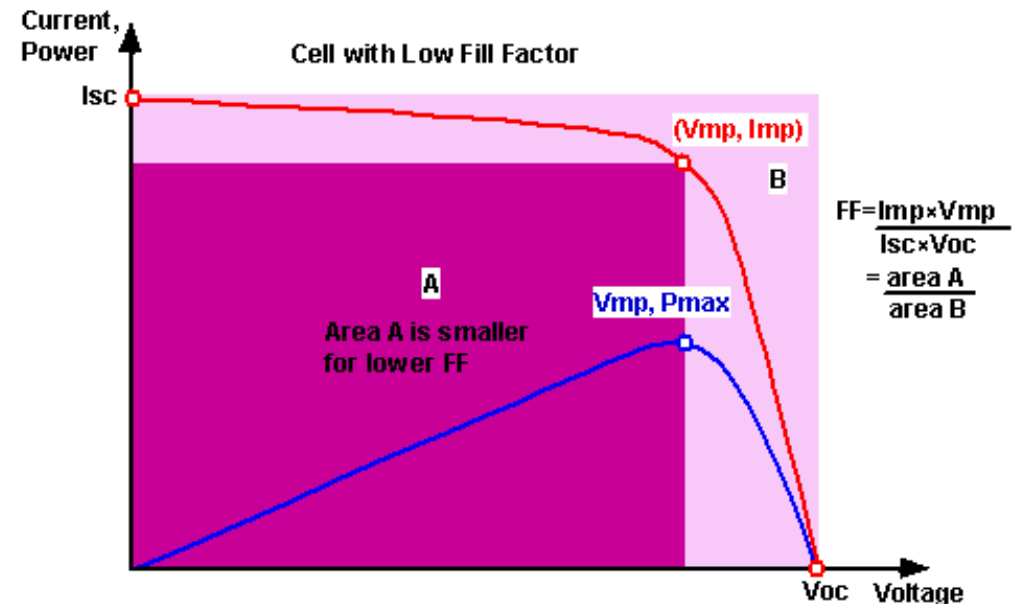
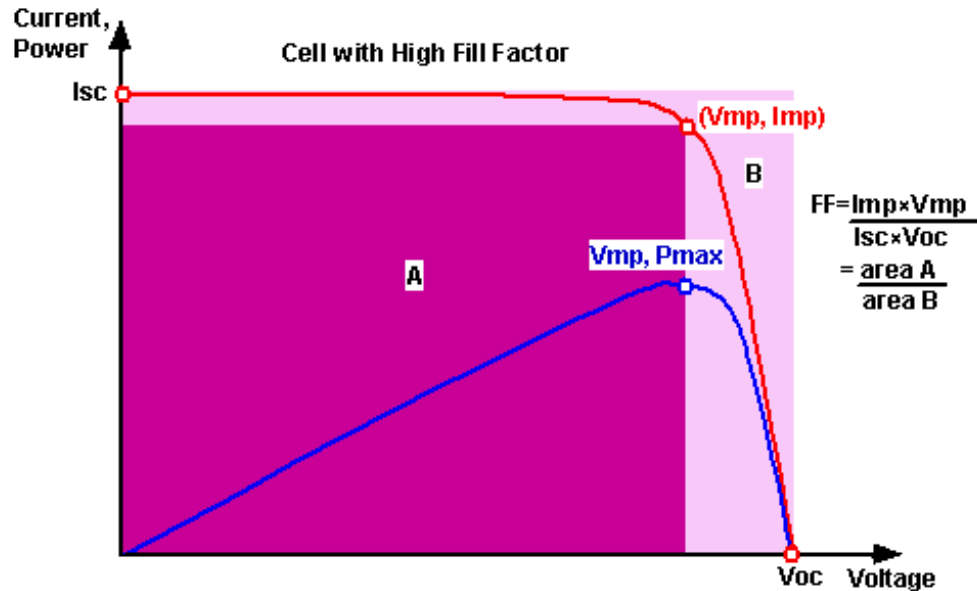


Maximum Power Point (P_{max})

곡선 인자 (fill factor)

- 곡선 인자 : 단락전류, 개방전압과 함께 태양전지의 최대 출력을 결정하는 인자
 - 단락전류, 개방전압의 곱에 대한 태양전지 최대 출력의 비율
 - I-V 곡선의 'squareness'의 척도

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

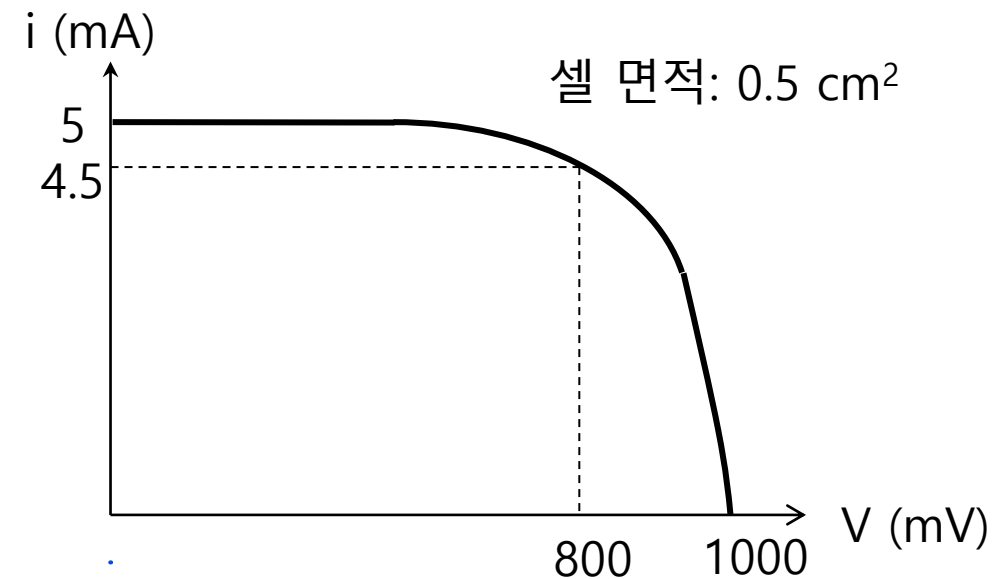


전력변환효율 (power conversion efficiency)

- 전력변환효율(PCE, power conversion efficiency):
 - 태양전지의 성능을 표현하는 인자
 - 입사 태양광의 스펙트럼과 세기, 온도 등에 의존

$$P_{\max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad \text{이므로,}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \times 100$$





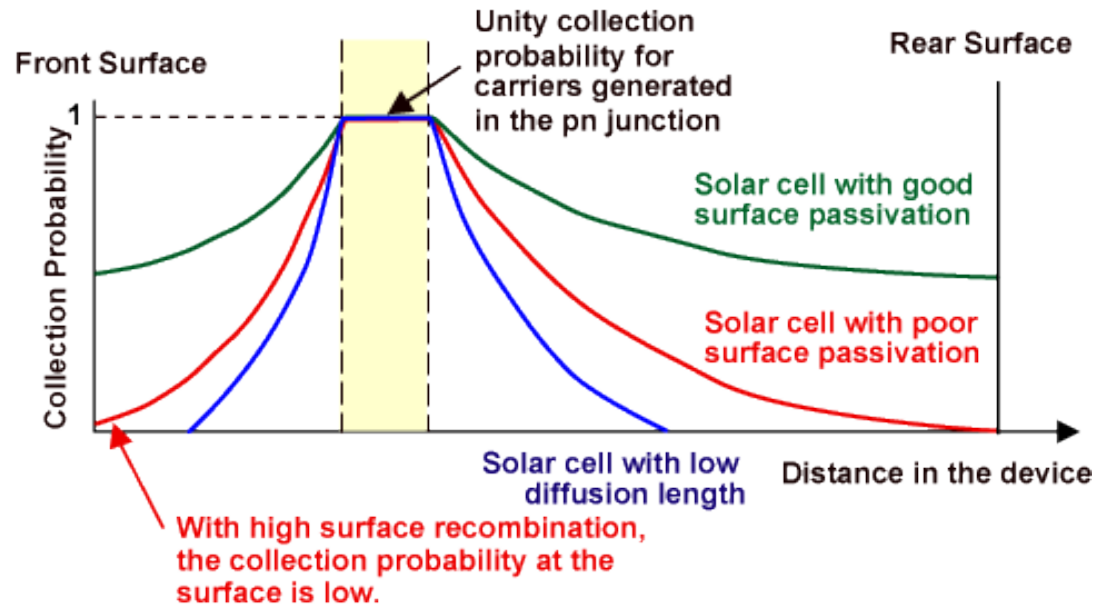
수집 확률

- 수집 확률 (collection probability)

: 빛의 흡수에 의해 생성된 캐리어가 광전류 생성에 기여하는 확률

- 소자의 어느 영역에서 생성되느냐에 따라 수집확률이 다르다.
- 캐리어의 확산 길이 대비 움직여야 하는 길이의 비율에 의존한다.
- 소자의 표면 특성에 의존한다.

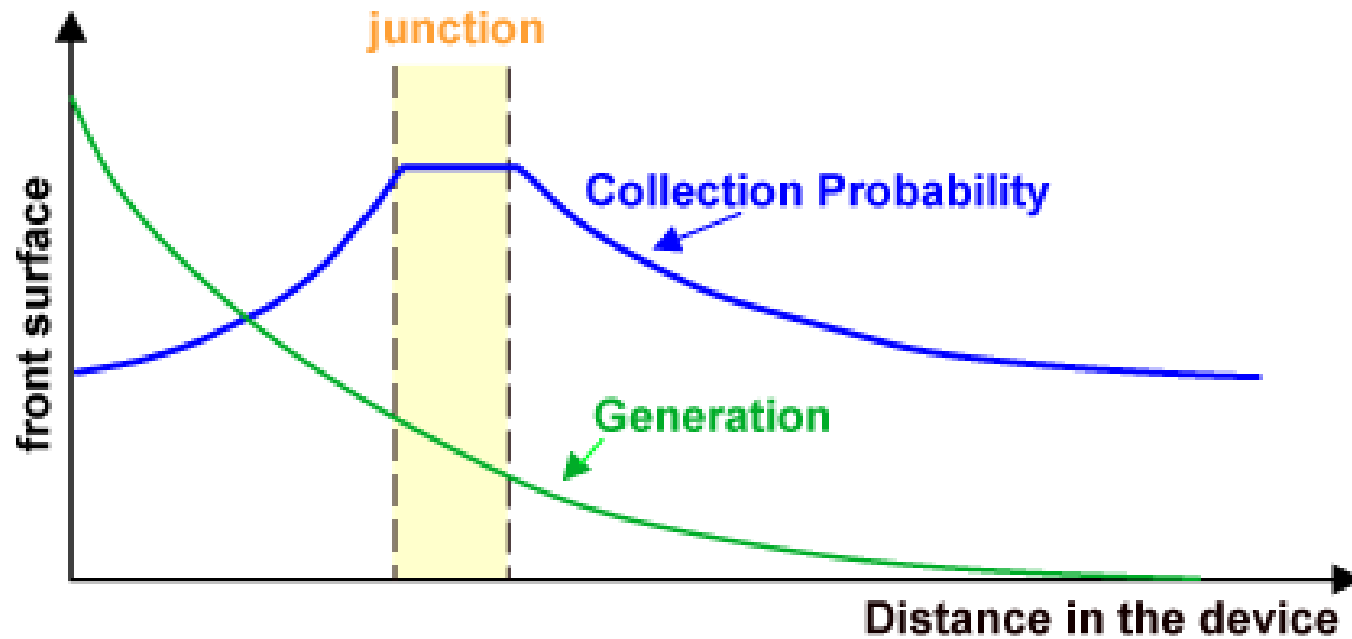
수집 확률



- 공핍 영역에서의 수집확률: 1
- 접합으로부터 멀어질 수록 수집확률은 떨어짐
(확산길이보다 먼 거리에서 생성된 캐리어의 수집 확률은 매우 낮다.)
- 표면과 같이 재결합 속도가 빠른 영역에서 생성된 캐리어는 수집확률이 낮다.

수집 확률

- 빛에 의해 생성된 전류 (J_L): 생성속도 (generation rate)와 수집확률 (CP)의 곱





양자 효율

- 양자 효율 (quantum efficiency, QE)

: 특정 에너지를 가지고 태양전지에 입사된 광자 (photon)의 개수 대비

태양전지에 의해 수집된 캐리어의 개수의 비율

- 양자 효율이 1인 경우: 특정 파장의 모든 광자들이 흡수되고 소수 캐리어들이 모두 수집된 경우
- 양자 효율이 0인 경우: 반도체의 밴드갭보다 낮은 에너지를 가진 광자 (흡수 X)

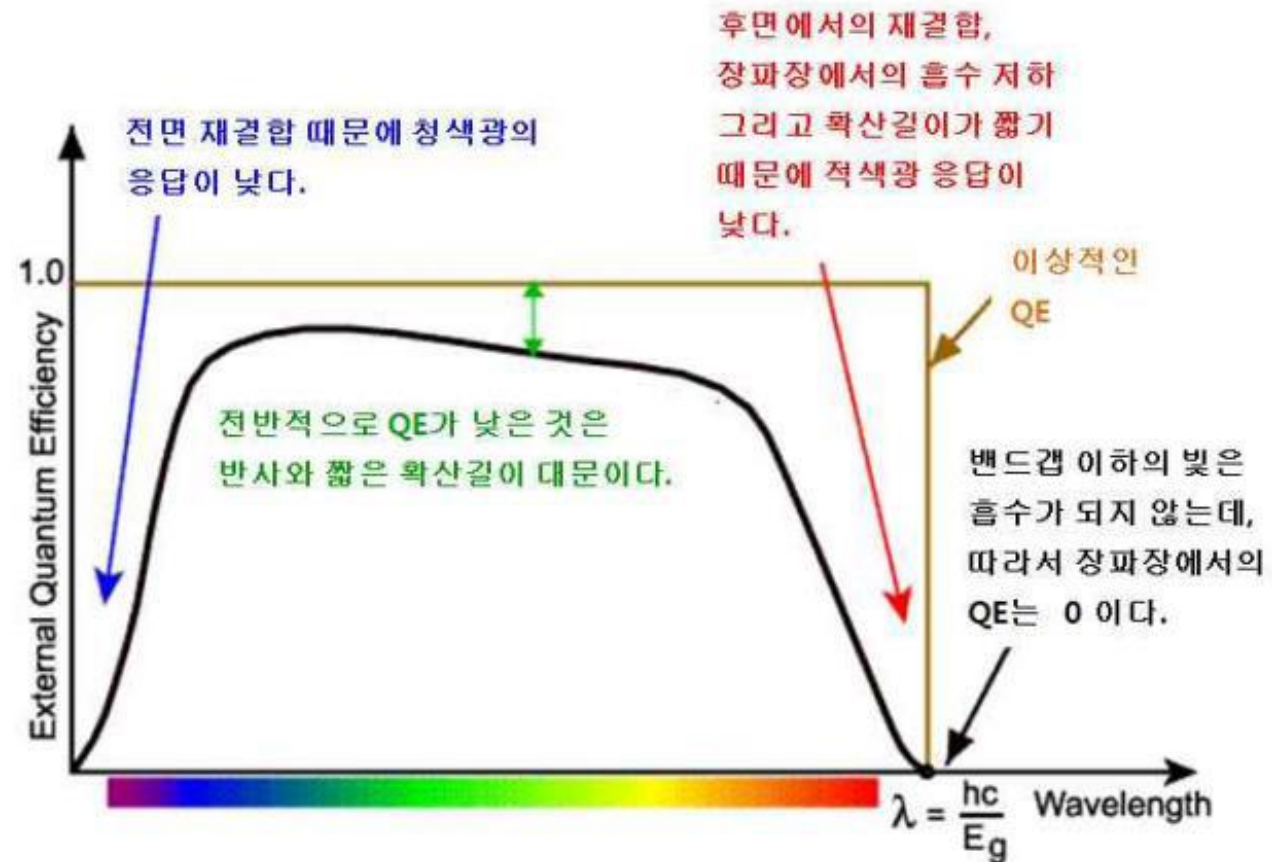
양자 효율


- 외부 양자 효율 (external quantum efficiency)

: 투과와 반사와 같은 광학적 손실 효과를 포함한 양자효율

- 내부 양자 효율 (Internal quantum efficiency)

: 수집 가능한 캐리어를 생성할 수 있는 효율





양자 효율

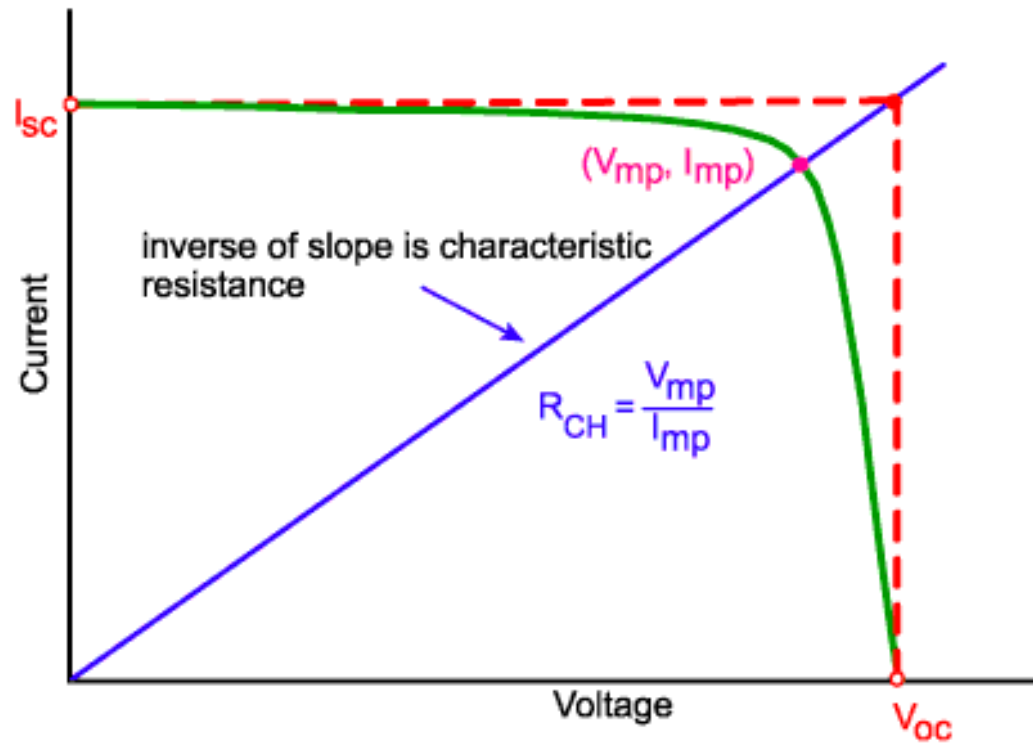
- IPCE (Incident photon to current conversion efficiency)

= 외부 양자 효율 (external quantum efficiency)

$$\text{IPCE } (\lambda) = \frac{\# \text{ of electrons/cm}^2 \cdot \text{s}}{\# \text{ of photons/cm}^2 \cdot \text{s}} = \frac{J_{\text{ph}} \times 1240}{P_{\text{lamp}} \times \lambda}$$

저항 효과

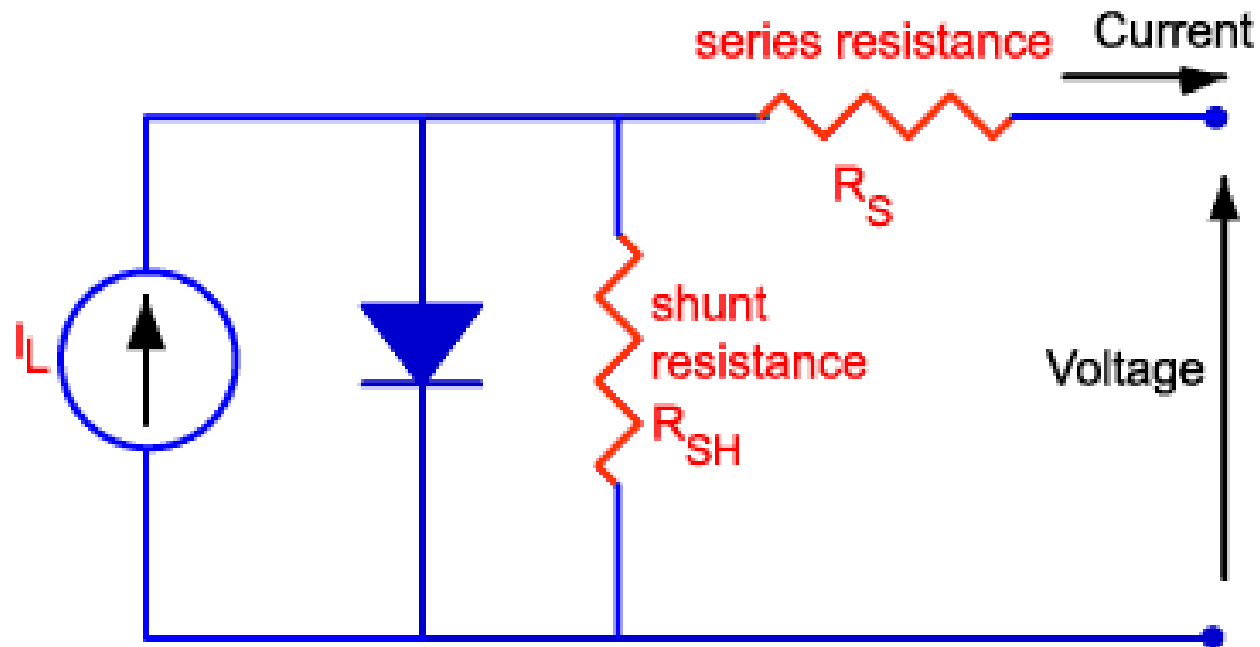
- 특성 저항 (characteristic resistance, R_{CH})
 - 최대 전력점에서의 태양전지의 출력 저항



$$R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$

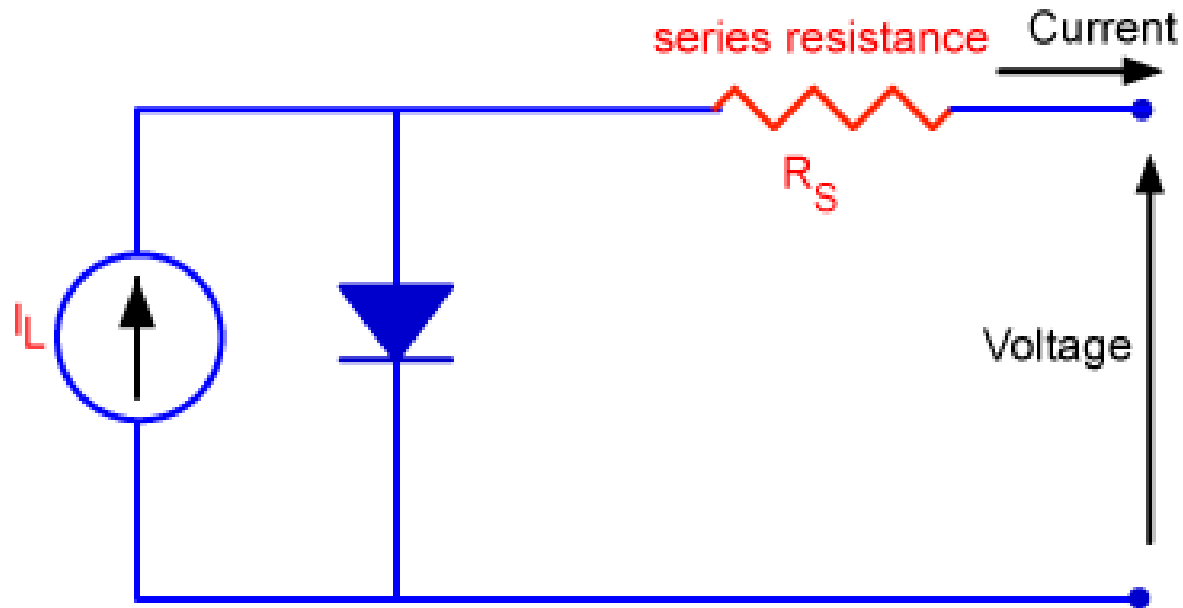
저항 효과

- 기생 저항 (parasitic resistance)
 - 태양전지 내의 요소에 의해 발생하는 저항
 - 직렬 저항 (series resistance)과 병렬 저항 (shunt resistance)으로 구성
 - fill factor의 저하에 의한 태양전지 효율 감소



저항 효과

- 직렬 저항 (series resistance)
 - 태양전지의 에미터와 베이스를 통한 전류의 흐름
 - 금속 전극과 에미터, 베이스 사이의 접촉 저항
 - 금속 전극 자체의 저항



저항 효과

- 직렬 저항에 의한 전력의 감소

$$\begin{aligned} P'_{MP} &= V_{MP} I_{MP} - I_{MP}^2 R_S = V_{MP} I_{MP} \left(1 - \frac{I_{MP}}{V_{MP}} R_S \right) = P_{MP} \left(1 - \frac{I_{SC}}{V_{OC}} R_S \right) \\ &= P_{MP} \left(1 - \frac{R_S}{R_{CH}} \right) = P_{MP} (1 - r_S) \end{aligned}$$

- 직렬 저항에 의한 fill factor의 감소

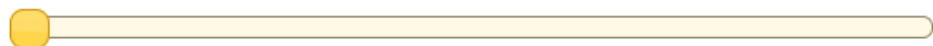
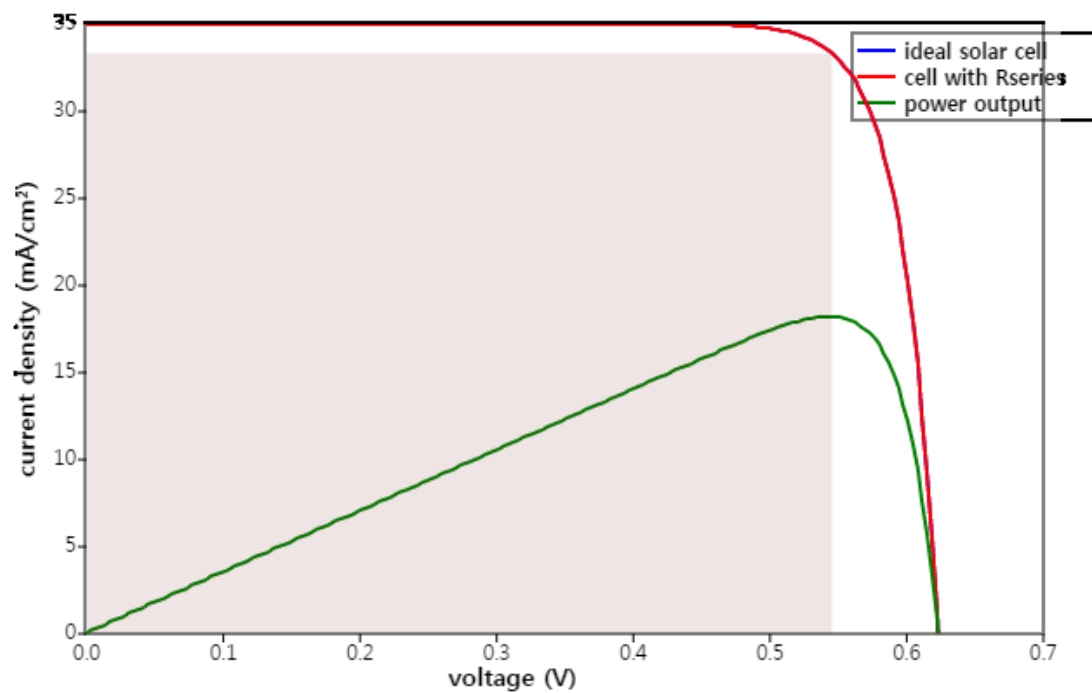
$$V'_{OC} I'_{SC} FF_S = V_{OC} I_{SC} FF_0 (1 - r_S)$$

개방 전압과 단락 전류가 변함이 없다고 가정하면,

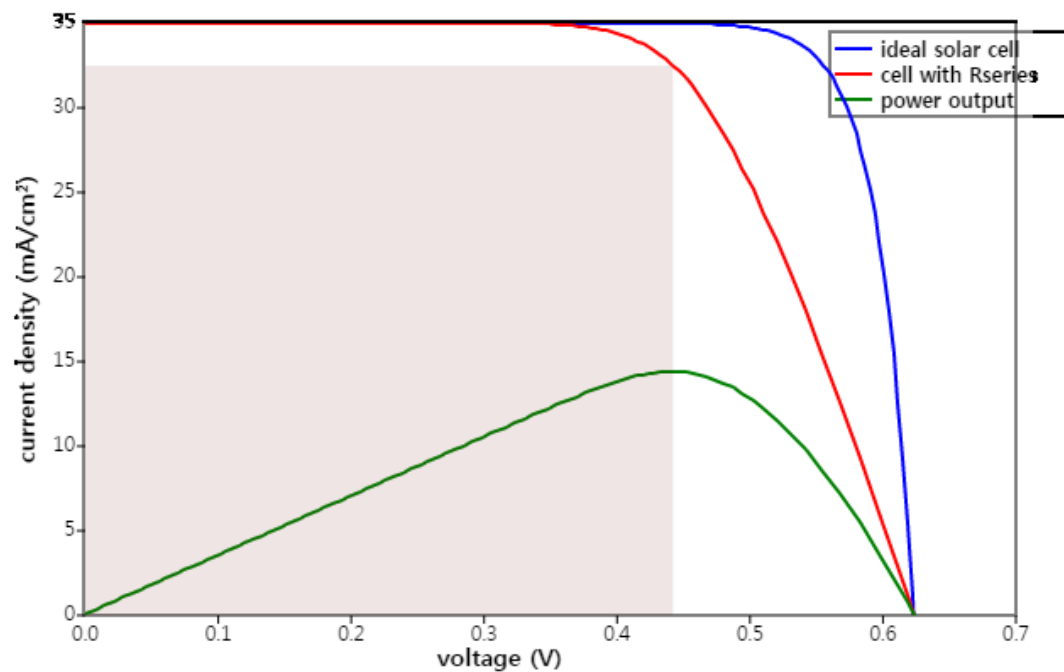
$$\therefore FF_S = FF_0 (1 - r_S)$$

저항 효과

- 직렬 저항에 의한 I-V 곡선의 변화



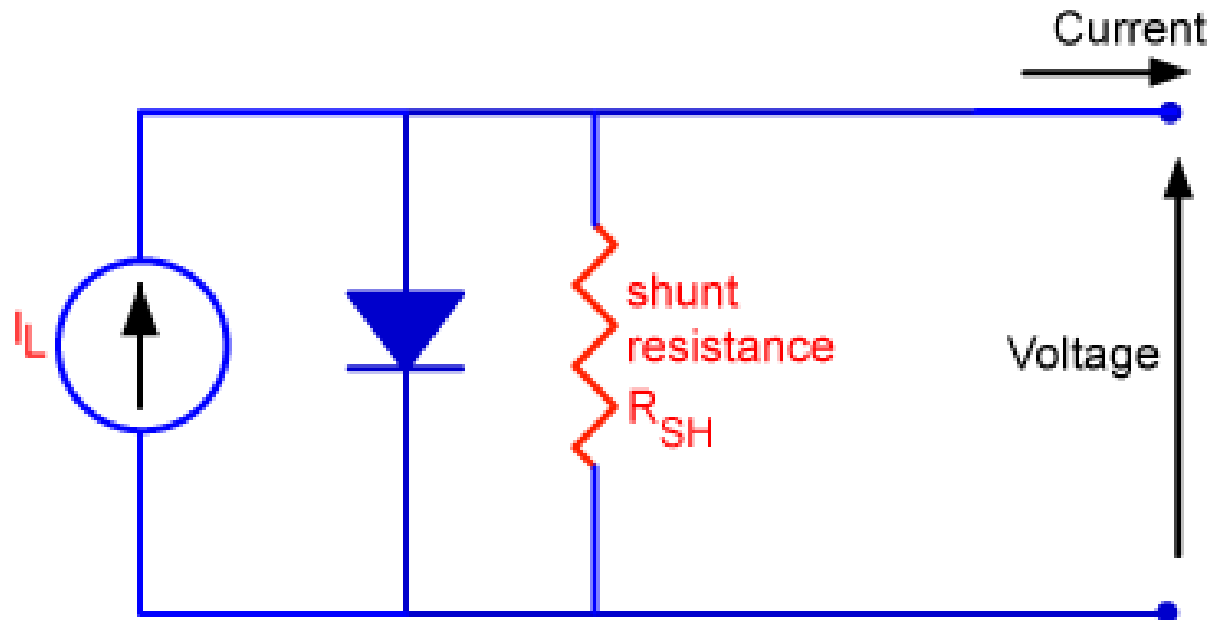
Cell series resistance is: 0 ohm cm^2



Cell series resistance is: 3.5 ohm cm^2

저항 효과

- 병렬 저항 (shunt resistance)
 - 제조상의 결함으로 야기됨.
 - 병렬 저항이 낮으면 광전류의 대체 경로 (우회로)가 제공됨.
 - 태양전지 접합을 통해 흐르는 전류의 양이 줄고, 개방전압이 낮아짐.



저항 효과

- 병렬 저항에 의한 전력의 감소

$$\begin{aligned} P'_{MP} &= V_{MP} I_{MP} - \frac{V_{MP}^2}{R_S} = V_{MP} I_{MP} \left(1 - \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \frac{1}{R_{SH}} \right) = P_{MP} \left(1 - \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \frac{1}{R_{SH}} \right) \\ &= P_{MP} \left(1 - \frac{R_{CH}}{R_{SH}} \right) = P_{MP} \left(1 - \frac{1}{r_{SH}} \right) \end{aligned}$$

- 직렬 저항에 의한 fill factor의 감소

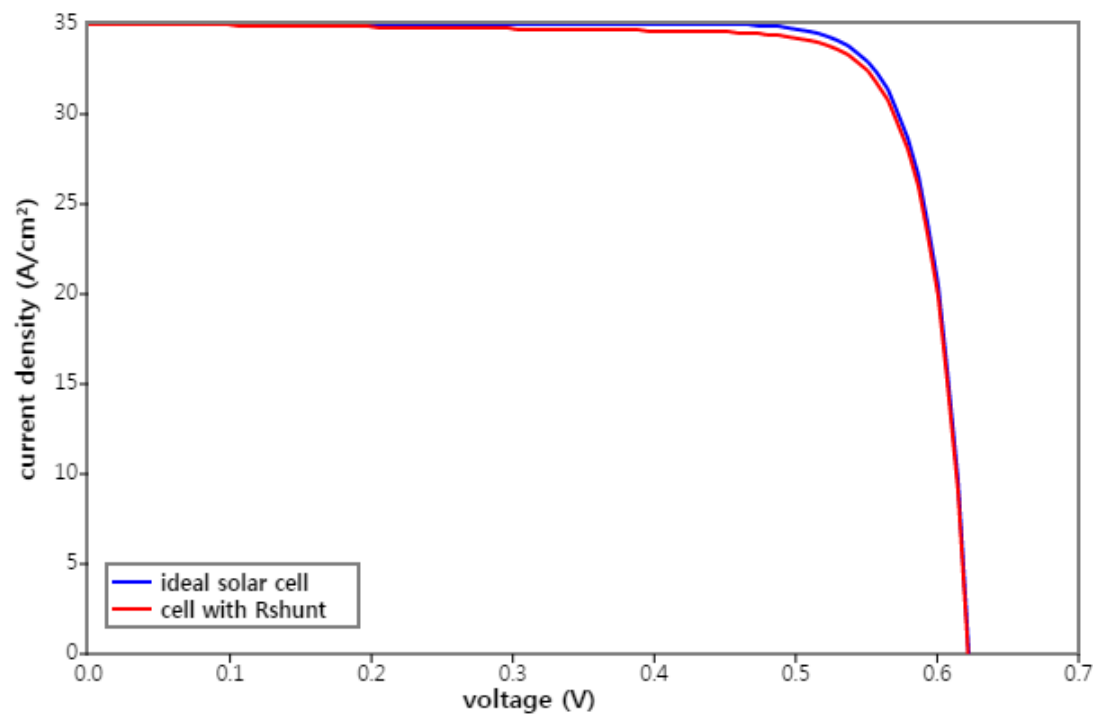
$$V'_{OC} I'_{SC} FF_{SH} = V_{OC} I_{SC} FF_0 (1 - 1/r_{SH})$$

개방 전압과 단락 전류가 변함이 없다고 가정하면,

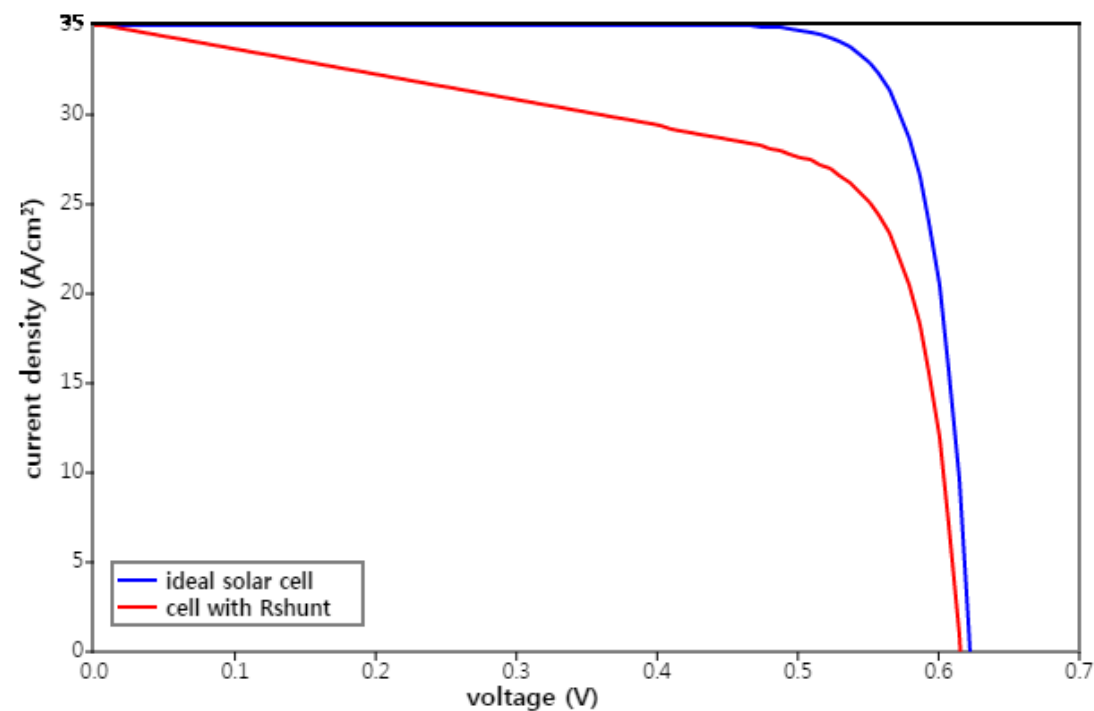
$$\therefore FF_{SH} = FF_0 (1 - 1/r_{SH})$$

저항 효과

- 병렬 저항에 의한 I-V 곡선의 변화



Cell shunt resistance is: $1.00 \times 10^3 \text{ ohm cm}^2$



Cell shunt resistance is: 70.8 ohm cm^2



빛 세기의 영향

- 빛 세기의 변화: 태양전지의 모든 요소들 (단락전류, 개방전압, 충전률, 효율 등)을 변화시킴.
- 태양전지에서 빛의 세기: "number of suns"으로 표기
 - 1 sun – AM 1.5에서의 표준 조사 혹은 1kW/m^2
 - 10 sun – 10 kW/m^2 의 세기
- 평판형 (flat plate) 모듈: 1 sun 조건에서 동작하도록 설계된 모듈
집광형 (concentrators) 모듈: 집광된 태양광 하에서 동작하는 모듈

빛 세기의 영향

- 집광형 태양전지 (CPV, concentrated photovoltaics)
 - 1 sun 보다 강한 빛에서 동작하도록 설계된 태양전지
 - 렌즈를 통해 집광하여 더 높은 세기의 빛이 태양전지 위에 비치도록 한다.
 - 장점: 높은 효율, 낮은 단가 (작은 면적)
 - 단점: 온도 조절

$$V'_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{XI_{sc}}{I_0} \right) = \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) + \ln X \right] = V_{oc} + \frac{kT}{q} \ln X$$

X : 집광 비율

온도의 영향

- 온도가 올라가면 반도체의 밴드갭이 감소
- 밴드갭의 감소에 따라 V_{oc} 감소, I_{sc} 약간 증가

