

# 캐리어 (Carriers)

한국기술교육대학교

에너지신소재화학공학부

나 윤 채



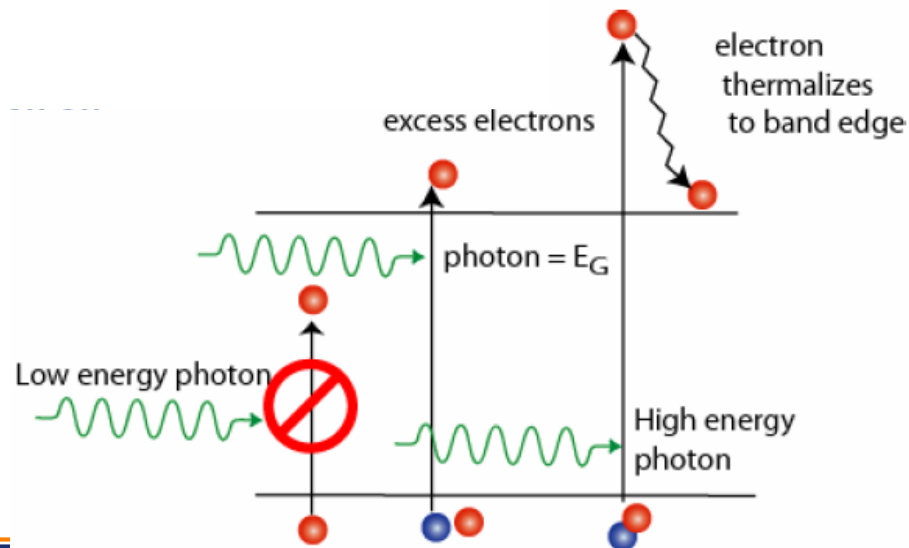
# 캐리어의 생성

---

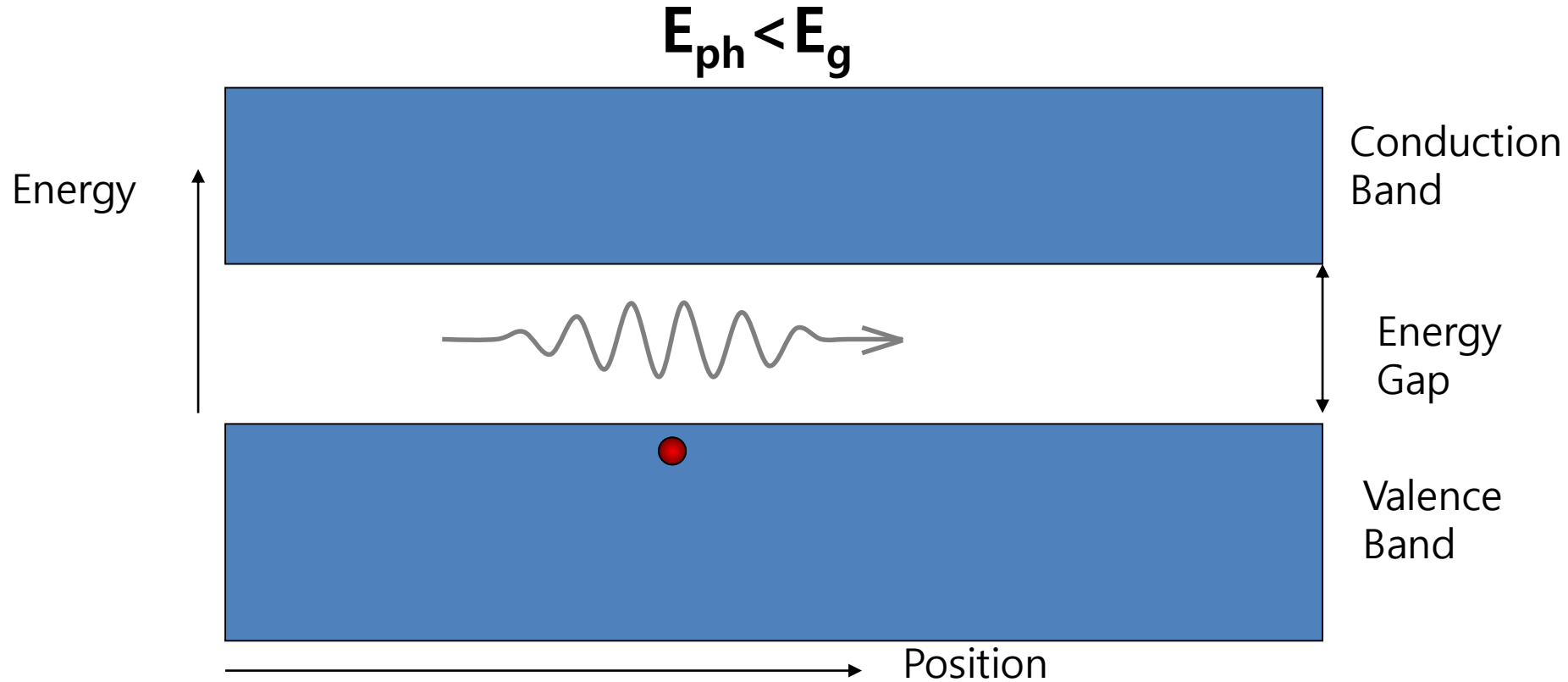
- 캐리어 생성 (generation)의 기본 조건
  - 여기 (excitation)에 필요한 캐리어 존재 (가전자대)
  - 캐리어가 존재할 수 있는 빈 상태 (state) 존재 (전도대)
  - 밴드갭보다 큰 에너지 주입
- 캐리어 생성에 필요한 에너지원
  - 모든 종류의 에너지원이 생성에 관여할 수 있음 (열, 빛, 전기 등)
  - 태양전지에서는 빛에 의한 흡수만 고려

# 캐리어의 생성: 빛의 흡수

- 빛에 대한 반도체의 반응: 반사, 투과, 흡수
- 빛 에너지( $E_{ph}$ )에 따라 흡수율 다름
  - $E_{ph} < E_g$ : 투과
  - $E_{ph} = E_g$ : 흡수
  - $E_{ph} > E_g$ : 흡수,  $E_g$ 보다 큰 에너지는 열로 바뀌어 재료의 온도를 높임.

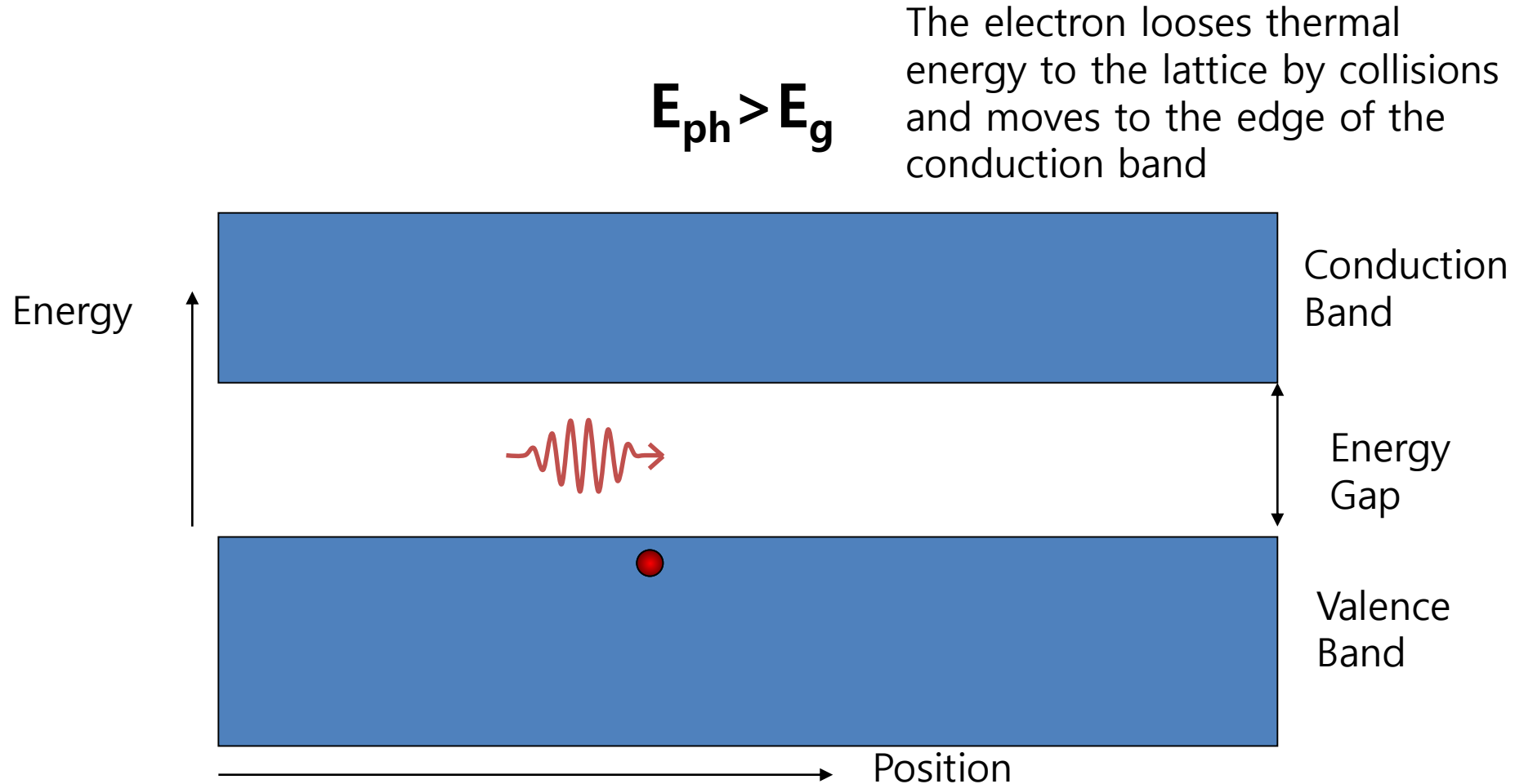


# 캐리어의 생성: 빛의 흡수



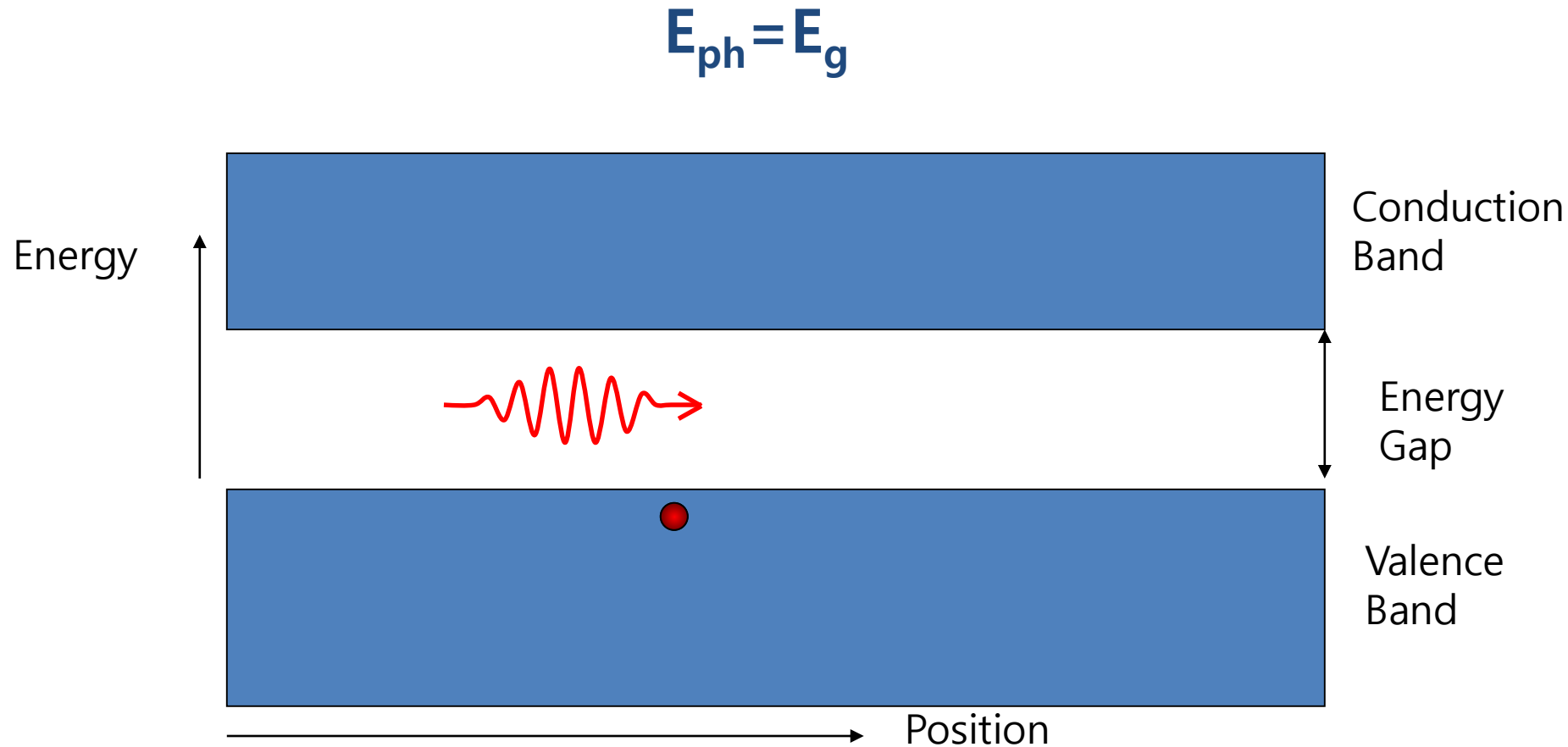
When the photon energy is less than the gap energy, the photon is not absorbed and the photon passes straight through the semiconductor

# 캐리어의 생성: 빛의 흡수



When the photon energy is greater than the gap energy, the photon is absorbed and an electron breaks from the lattice and moves from the valence band into the conduction band.

# 캐리어의 생성: 빛의 흡수



When the photon energy is equal to the gap energy, the photon is again absorbed but no thermal energy is generated.

# 캐리어의 생성: 흡수 계수

- 흡수 계수  $\alpha$  (absorption coefficient): 빛이 흡수되는 정도를 나타내는 변수  
파장의 함수, 소재의 특징

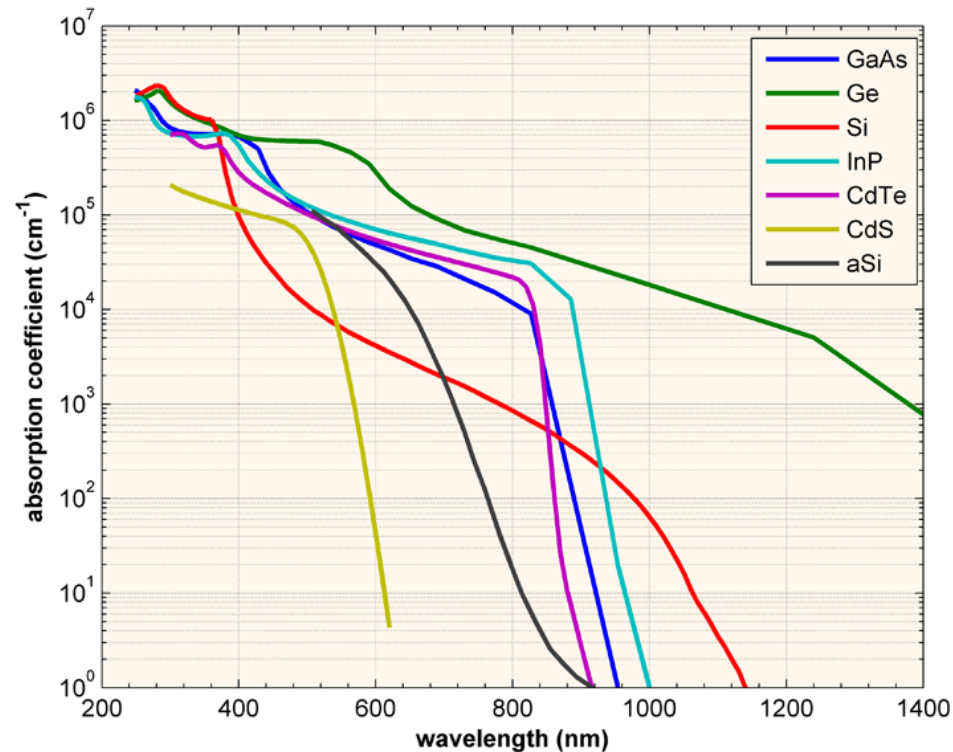
Beer-Lambert law

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

$I$ : 재료 깊이  $x$  에서의 빛의 세기

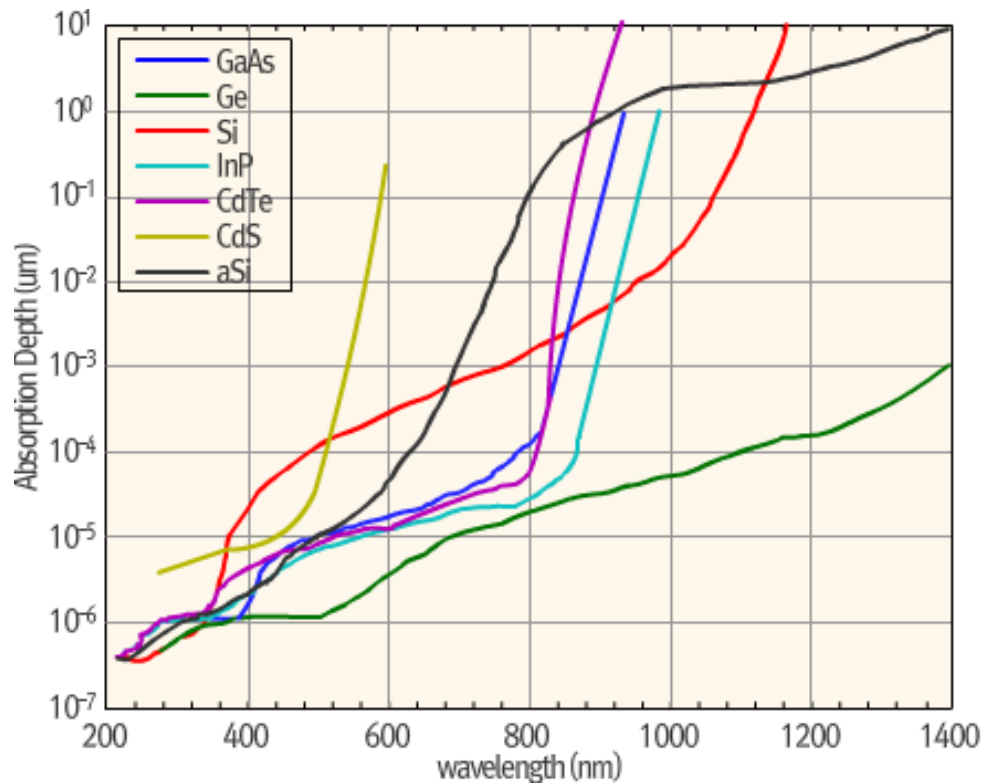
$I_0$ : 재료 표면에서의 빛의 세기

$\alpha$ : 흡수계수



# 캐리어의 생성: 흡수 깊이

- 흡수 깊이 (absorption depth) or 침투 깊이 (penetration depth)
  - 흡수 계수의 역의 개념 ( $1/\alpha$ )
  - 빛이 초기 세기의  $1/e$  (37%)로 떨어질 때 까지 재료 속으로 침투한 깊이
  - 단파장의 빛은 흡수 깊이가 작고, 장파장의 빛은 흡수 깊이가 크다.
  - 반도체 재료의 두께와 같은 태양전지 설계에 영향을 미친다.





# 캐리어의 생성: 흡수 깊이

- 빛 흡수에 의해 전자와 정공이 생성됨.
- 재료 깊이  $x$  에서의 광자유량 ( $N_{ph}$ )

$$N_{ph} = N_0 e^{-\alpha x} \quad N_0: \text{재료 표면에 조사되는 광자유량}$$

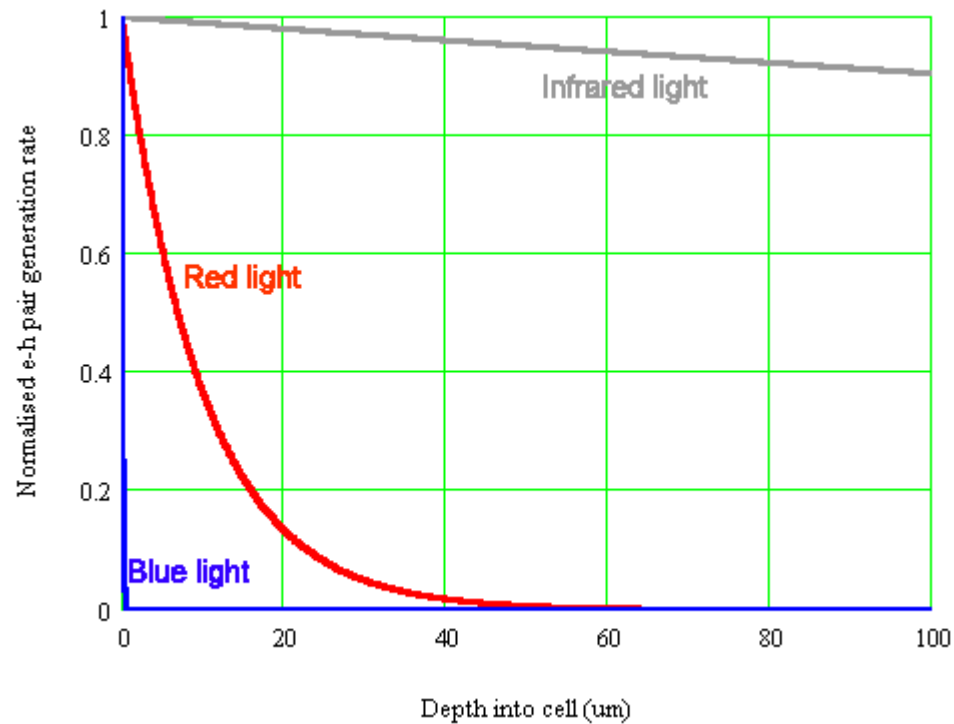
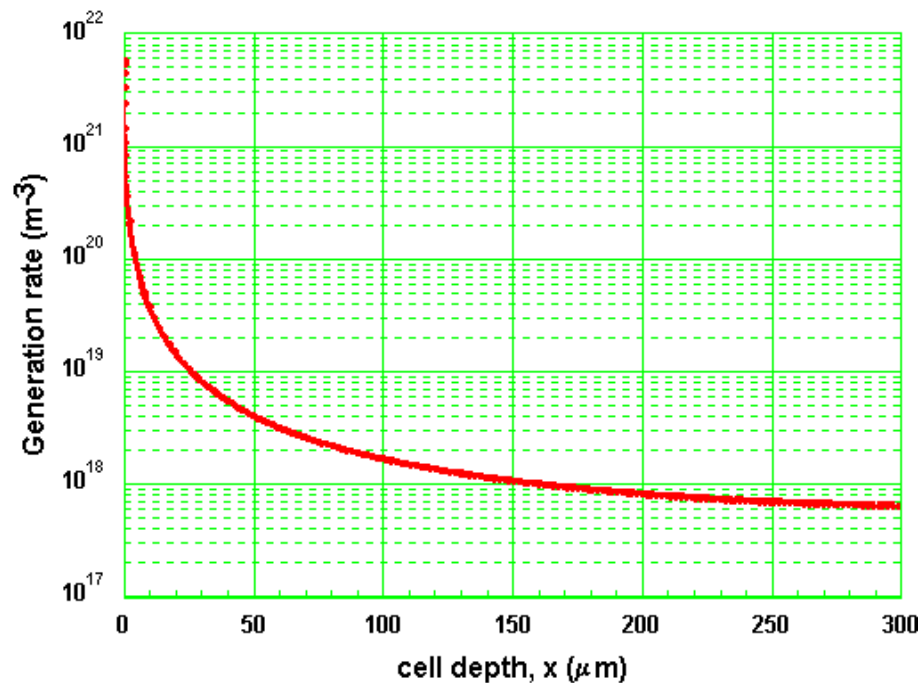
- 생성 속도 (generation rate): 재료의 깊이에 따른 광자의 흡수에 의해 결정됨

$$G = -\frac{dN_{ph}}{dx} = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad G: \text{재료 깊이 } x \text{ 에서의 생성 속도}$$

⇒ 생성 속도는 재료의 표면에서 가장 높고, 이후 기하급수적으로 감소한다.

# 캐리어의 생성: 흡수 깊이

- 생성 속도는 빛의 파장 및 흡수 깊이에 의존한다.
- 흡수 계수가 크다는 것은 캐리어의 생성이 표면에서 주로 일어남을 의미한다.
- 흡수 계수가 작다는 것은 재료 내에 캐리어의 생성이 내부에서 균일함을 의미한다.





# 재결합: 재결합의 유형

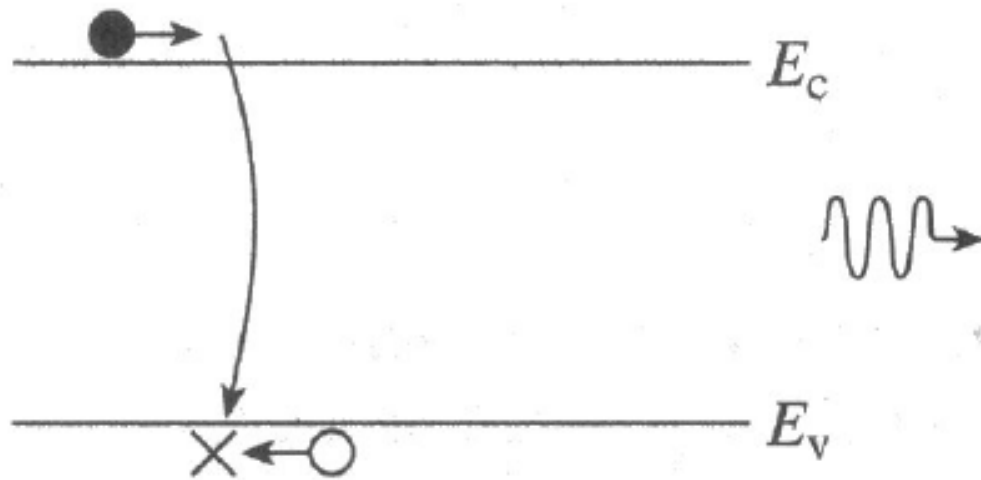
---

- 전도대에 있는 전자는 준안정상태이기 때문에 시간이 지나면 가전자대의 빈 자리로 다시 이동한다.  
즉, 가전자대의 정공과 재결합하여 사라진다.
- 재결합의 종류
  - 1) 직접 재결합 (Band-to-band recombination) or 복사성 재결합 (radiative recombination)
  - 2) 쇼클리-리드-홀 재결합 (Shockley-Read-Hall recombination)
  - 3) 오제 재결합 (Auger recombination)

# 재결합: 재결합의 유형

## 1) 직접 재결합 (Band-to-band recombination)

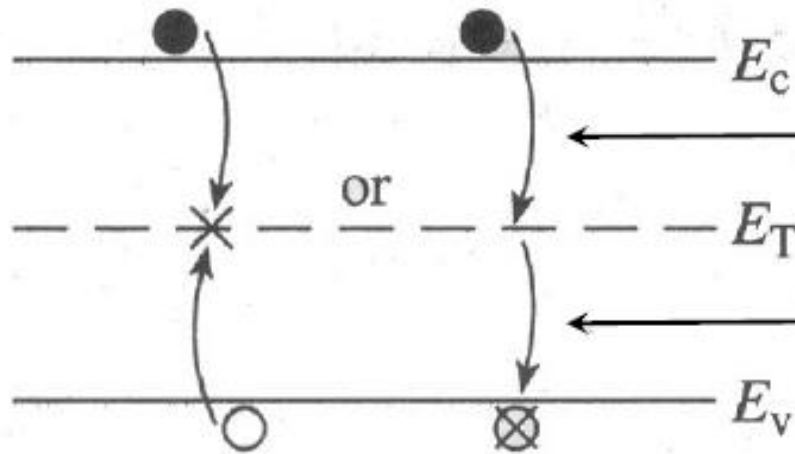
- 직접 천이형 반도체에서의 지배적인 재결합 유형
- 전도대의 전자가 가전자대의 정공과 직접 결합하고 광자를 내놓는다.
- 광자는 밴드갭과 비슷한 에너지를 갖기 때문에 반도체에 흡수되는 정도가 약하고, 따라서 반도체 밖으로 빠져나갈 수 있다.



# 재결합: 재결합의 유형

## 2) 쇼클리-리드-홀 재결합 (Shockley-Read-Hall recombination)

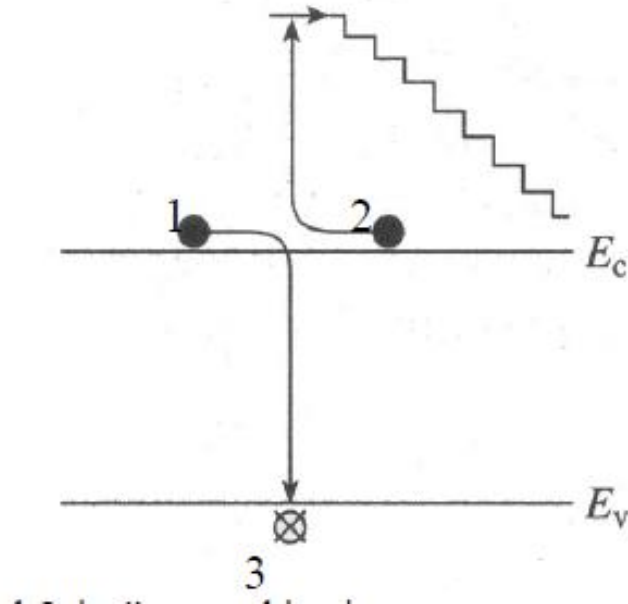
- 전자가 밴드갭 내부에 존재하는 결함 에너지 준위를 거치면서 가전자대 정공과 재결합
- 결함은 의도되지 않게 생성되었거나, 도핑에 의해 생성



# 재결합: 재결합의 유형

## 3) 오제 재결합 (Auger recombination)

- 3개의 캐리어가 참여
- 전자와 정공이 재결합한 후, 발생한 에너지 (열 또는 빛)가 반도체 밖으로 방출되기 보다는 전도대의 전자에게 전달된다. 이후 전자는 열을 방출하며 전도대 끝으로 이동한다.
- 고농도 도핑과 같이 캐리어의 농도가 매우 높은 경우에 주로 발생





# 재결합: 수명

---

- 캐리어 수명 (carrier lifetime):
  - 빛에 의해 소수 캐리어의 개수가 평형상태의 값 이상으로 증가하면 재결합에 의해 평형 캐리어 농도로 감소
  - 전자-정공 쌍이 만들어 진 후 재결합할 때까지의 평균 시간.
  - 태양전지 효율의 중요한 요소임.
  - 실리콘에서 캐리어의 수명은 보통 1 msec 정도이다.

# 재결합: 확산 길이

- 확산 길이 (diffusion length)
  - 전자-정공 쌍이 만들어진 후 재결합할 때까지의 평균 이동 거리.
  - 실리콘은 간접 천이형 반도체이기 때문에 직접 재결합은 적고, 결함에 의한 쇼클리-리드-홀 재결합의 비중이 높음.
  - 도핑이 많이 되면 오제 재결합의 비중도 높아지게 됨.

$$L = \sqrt{D\tau}$$

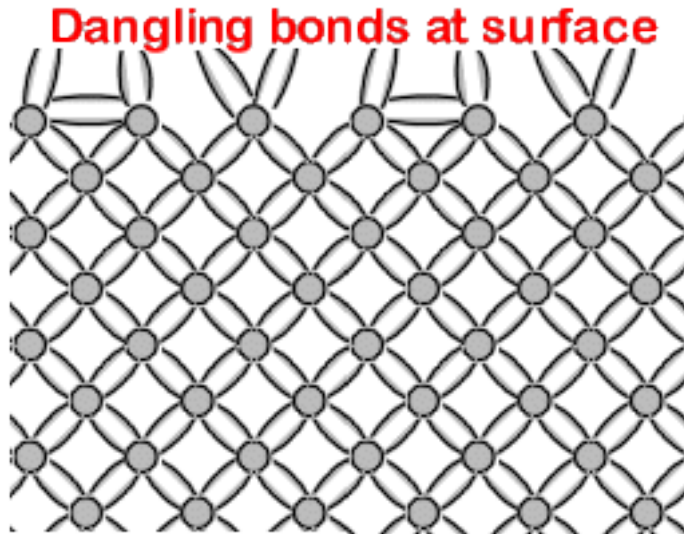
$L$ : 확산 길이  
 $D$ : 확산 계수 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\tau$ : 수명

- 단결정 실리콘의 확산 길이는 보통 100~300  $\mu\text{m}$ 임.



# 재결합: 표면 재결합

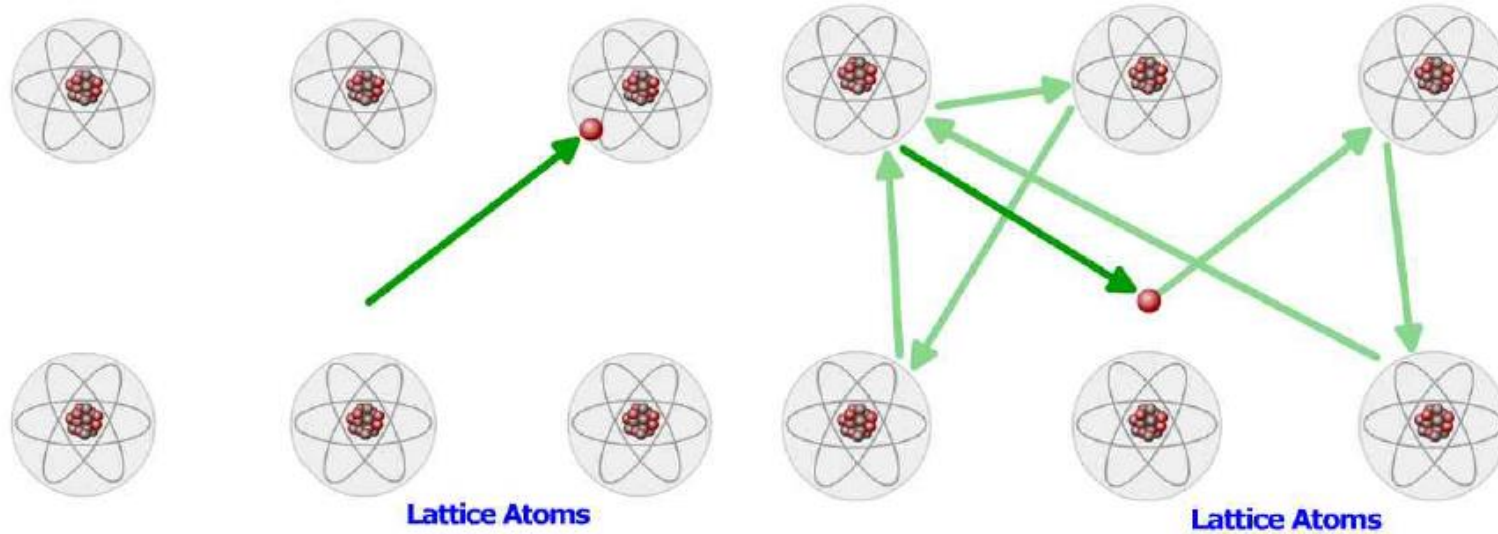
- 반도체 내부 혹은 표면의 결함 및 불순물은 재결합을 촉진.
- 태양전지의 표면: 결정격자가 심하게 붕괴된 상태이므로 재결합이 매우 잘 일어남.



- 표면 불포화 결합 (dangling bond)
  - 결정격자의 주기성 중단에 의해 생김.
- 표면 재결합의 감소를 위해 불포화 결합을 줄임
  - ⇒ 표면 부동태화 (surface passivation)

# 캐리어 수송: 반도체에서의 캐리어의 움직임

- 캐리어들은 평균속도 ( $1/2 mv^2$ )으로 반도체 격자 주위를 무질서하게 움직인다.
- 어떤 방향이든 캐리어의 실질 (net) 이동은 0이다.



1) 전자는 하나의 결함이나 혹은 격자 원자를 만나 분산될 때까지 임의의 방향으로 움직인다.

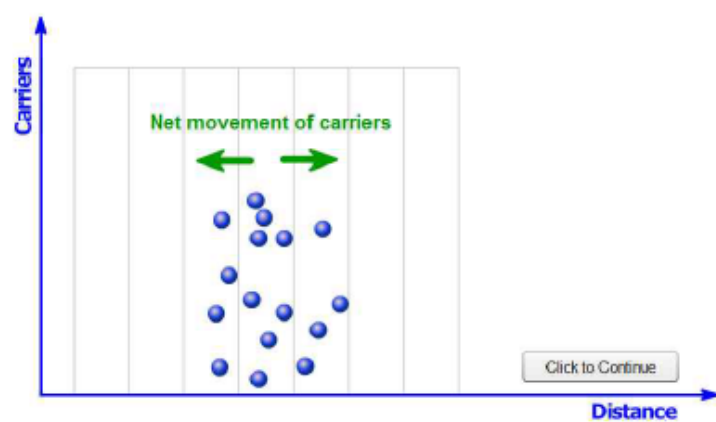
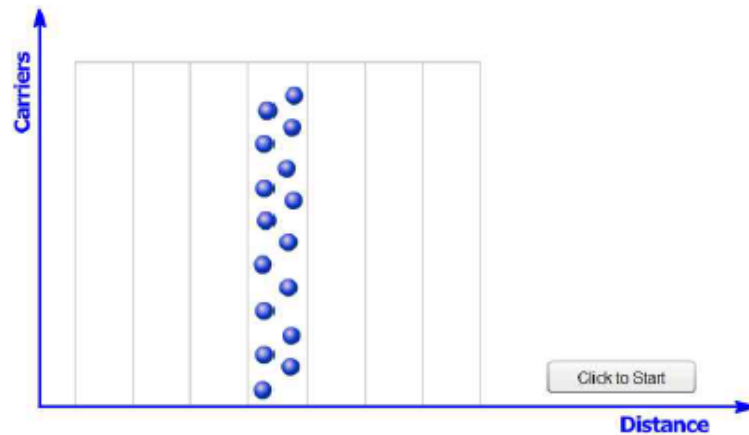
2) 각 방향은 그 가능성이 똑 같으므로 전자의 실질(net) 움직임은 제로이다.



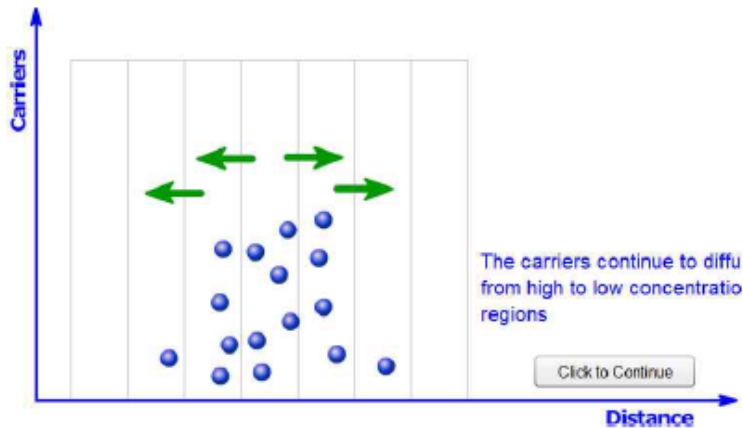
# 캐리어 수송: 확산 (diffusion)

- 확산: 농도의 차이로 인한 캐리어의 실질적인 (net) 움직임.
- 확산의 방향: 고농도  $\rightarrow$  저농도
- 확산의 요인: 캐리어의 무질서함 움직임. 반도체 소자의 모든 영역에서 캐리어들이 특정 방향으로 흐르는 확률은 동일함.
- 확산의 효과: 외부의 힘에 의존하지 않고 캐리어의 농도를 고르게 유지함.
- 확산 속도는 확산 계수 (diffusivity)에 의해 결정되고, 온도를 높이면 속도가 증가함.

# 캐리어 수송: 확산 (diffusion)

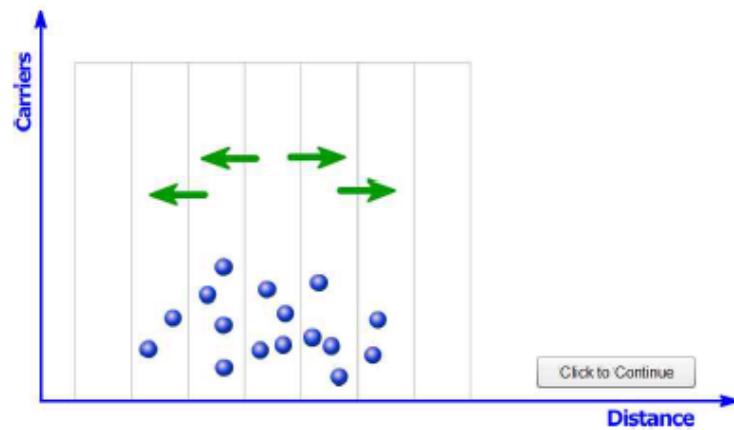


1) 여기서 캐리어들의 1/4은 오른쪽으로, 1/4은 왼쪽으로, 그리고 나머지는 그 자리에서 아래위로 움직인다.

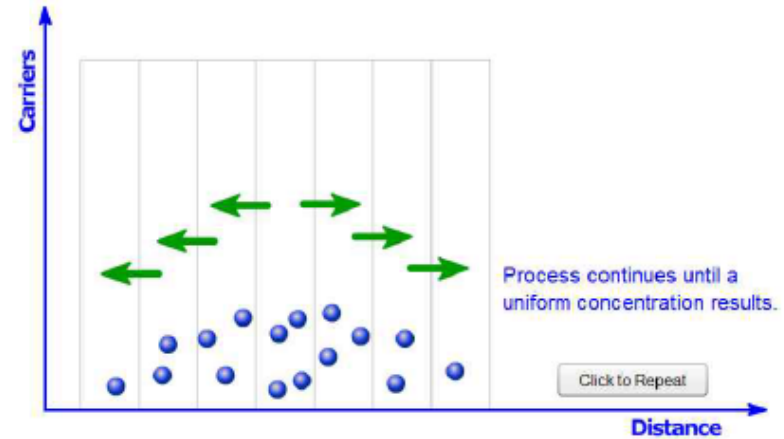


2) 캐리어의 1/4은 고농도 영역을 빠져나오나 들어가지는 않는다. 그래서 고농도 영역에서 빠져나오는 캐리어들의 net 움직임이 있다.

# 캐리어 수송: 확산 (diffusion)



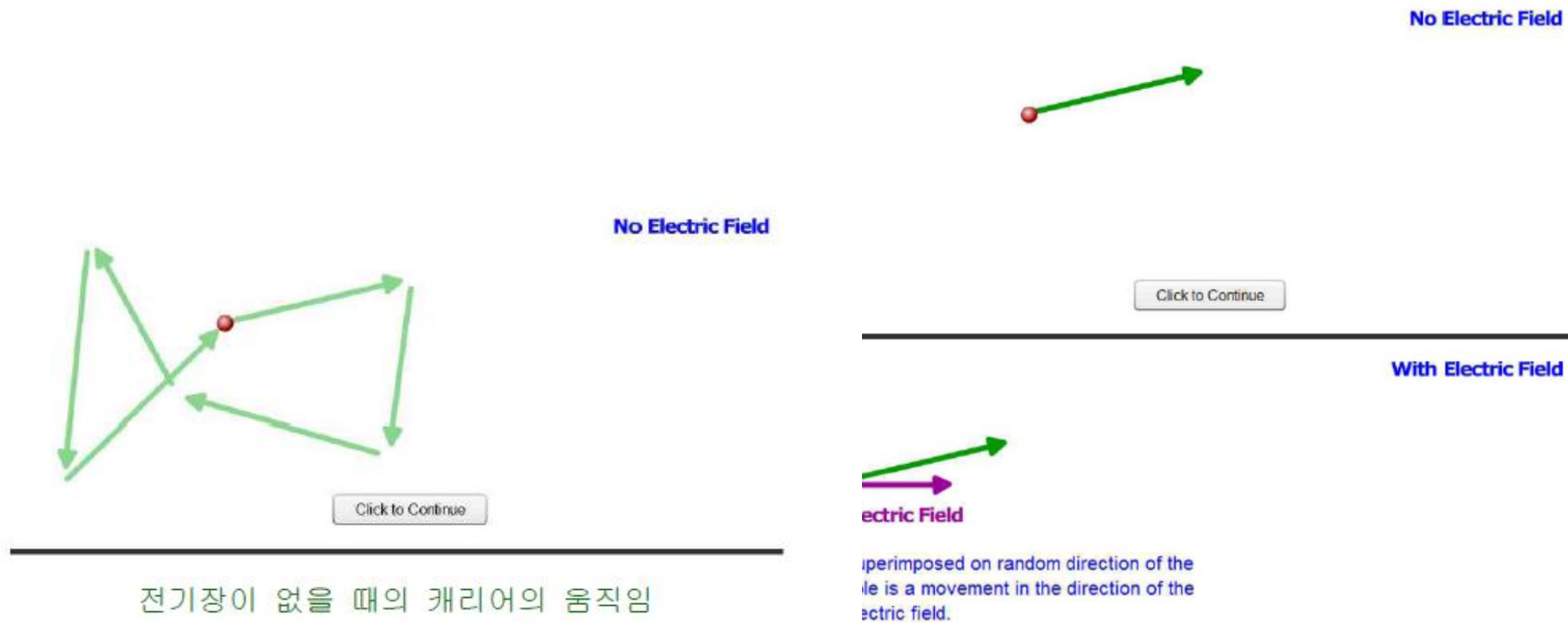
3) 캐리어들은 계속해서 고농도 영역에서 저농도 영역으로 확산한다.



4) 농도가 균일할 때까지 확산 프로세스가 계속된다.

# 캐리어 수송: 드리프트 (drift)

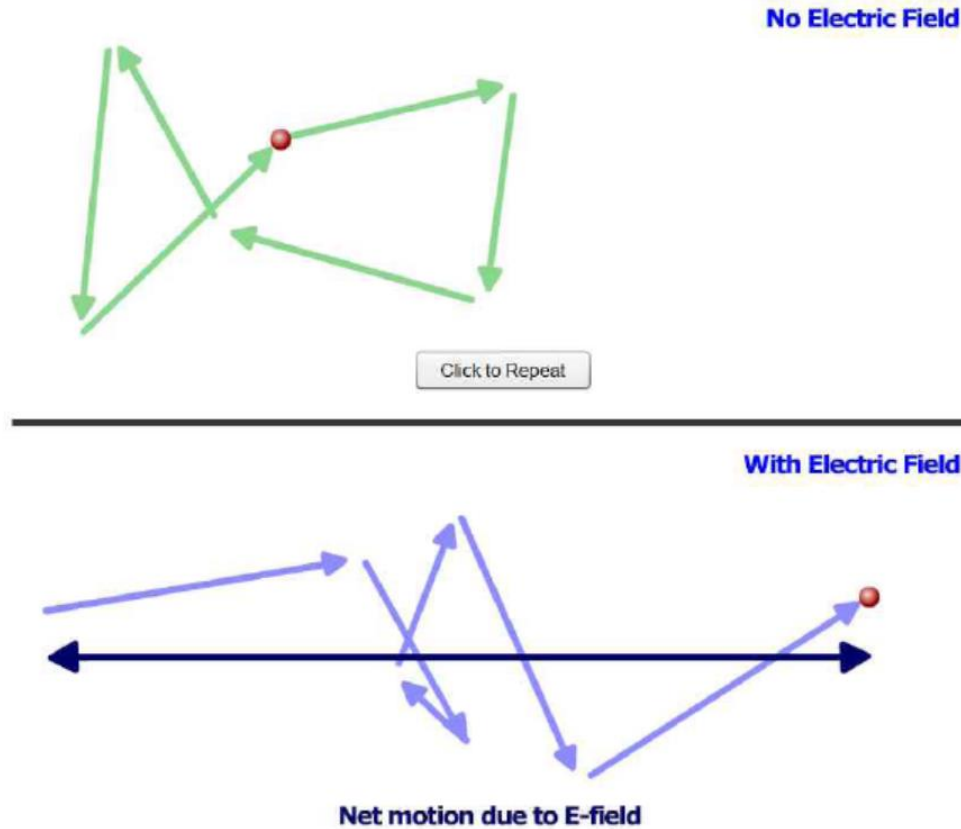
- 드리프트: 전기장이 인가되었을 때 전하를 가진 캐리어들의 움직임.
  - 자유전자: 전기장 반대방향으로 움직임.
  - 정공: 전기장 방향으로 움직임.
  - 캐리어의 움직임은 이동도 (mobility)로 나타냄.



전기장이 없을 때의 캐리어의 움직임

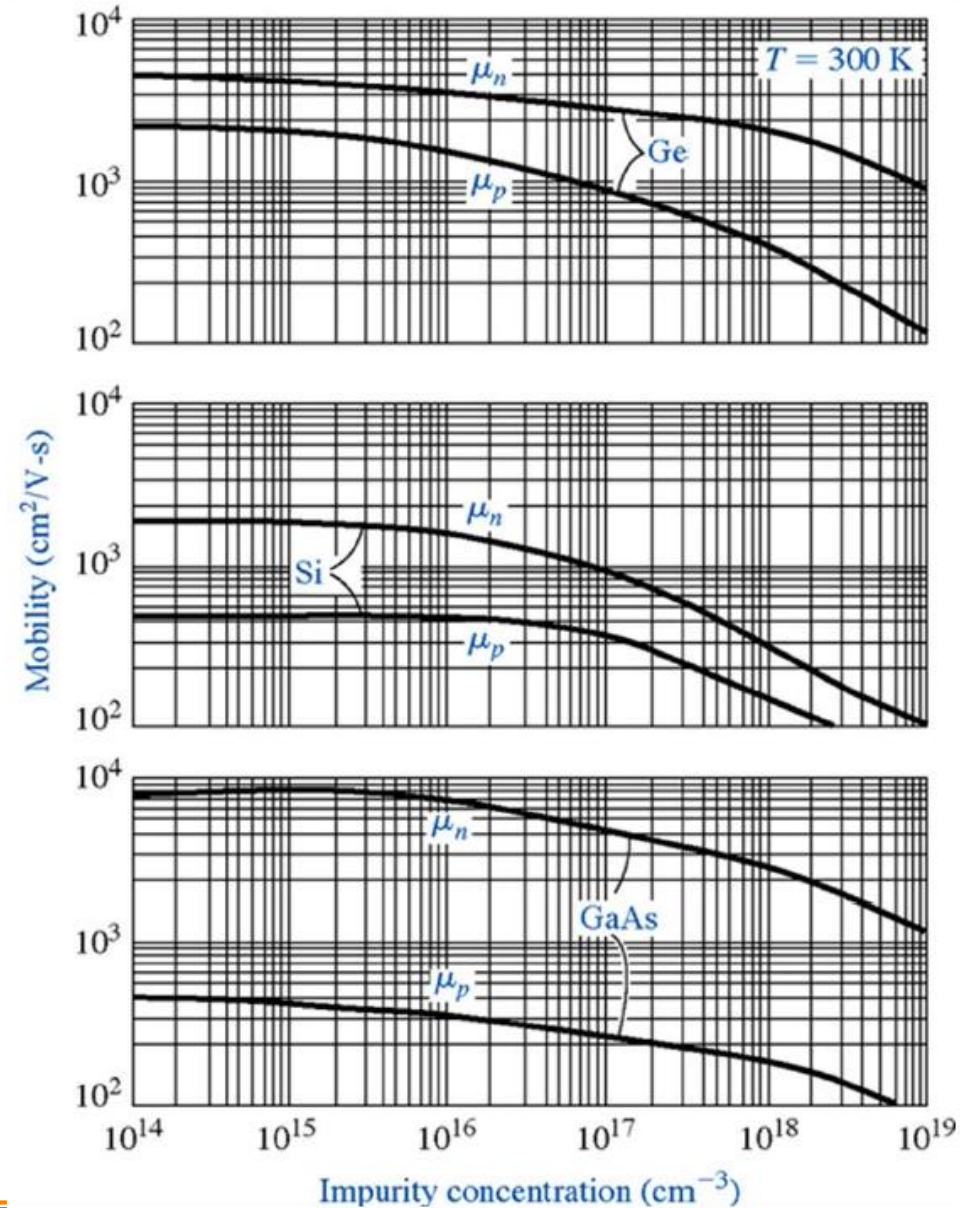
정공의 무질서한 움직임에 전기장 방향으로의 움직임이 중첩

# 캐리어 수송: 드리프트 (drift)



애니메이션은 전기장의 존재가 어떻게 캐리어의 실질적(net)인 이동을 유도하는지 보여준다. 이 애니메이션에서 캐리어는 하나의 정공으로 전기장과 동일한 방향으로 움직인다.

# 캐리어 수송: 드리프트 (drift)





# 총 전류 밀도

- 4가지 전류 메커니즘

전자 드리프트 + 전자 확산 + 정공 드리프트 + 정공 확산

