1. SiC가 금속 전극과 schottky contact을 형성하게 될 때 그림과 같이 strong forward bias가 걸리게 될 경우 minority carrier가 tunneling을 통하여 potential barrier를 통과할 수 있다. 따라서 이 경우 통상적인 LED의 동작 전압보다 높은 전압(10~110 V)에서만 발광 현상이 일어나게 된다.

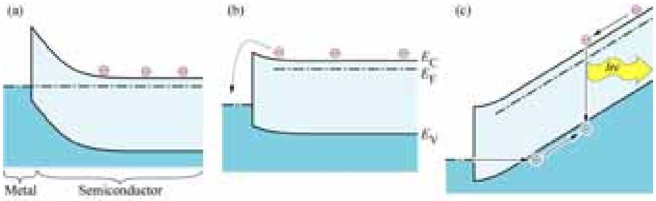

Fig. 1.2. Band diagram of a Schottky diode under (a) equilibrium conditions, (b) forward bias, and (c) strong forward bias. Under strong forward bias, minority carrier injection occurs making possible near-bandgap light emission.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

2. GaP는 간접천이형 반도체이지만 질소가 ‘optically active isoelectronic impurity’ 상태로 국지적으로 도핑될 경우 슈뢰딩거의 불확정성 원리에 따라 실제 공간상에서 국지적으로 존재하는 wave function (small Δx)은 momentum space 에서 delocalized level(large Δκ)을 나타나게 되므로 optical transition이 일어날 수 있다.

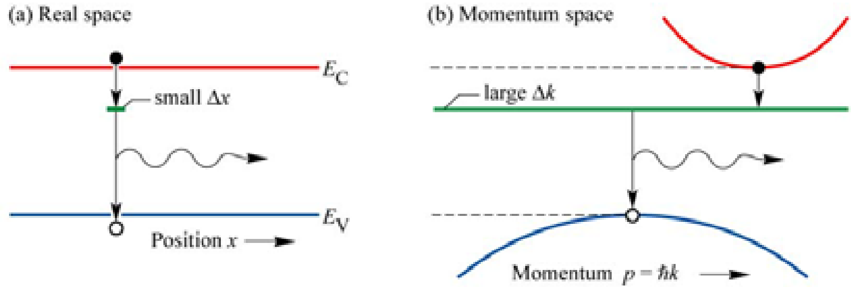

Fig. 1.5. (a) Real-space and (b) momentum-space optical transitions in GaP doped with an optically active impurity such as O or N, emitting in the red and green parts of the spectrum, respectively. GaP LEDs employ the *uncertainty principle* ($\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$) which predicts that an electron wave function localized in real space is delocalized in momentum space, thereby making momentum-conserving (vertical) transitions possible.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

3. band gap energy가 다른 두 물질이 맞닿아 있는 구조를 도입하면 barrier에 의하여 carrier들이 confine되는 구조를 형성할 수 있다. Active region으로 주입된 carrier는 barrier에 의하여 junction 내부에 confine되게 된다. 따라서 active region에서의 radiative recombination 확률이 높아지게 된다

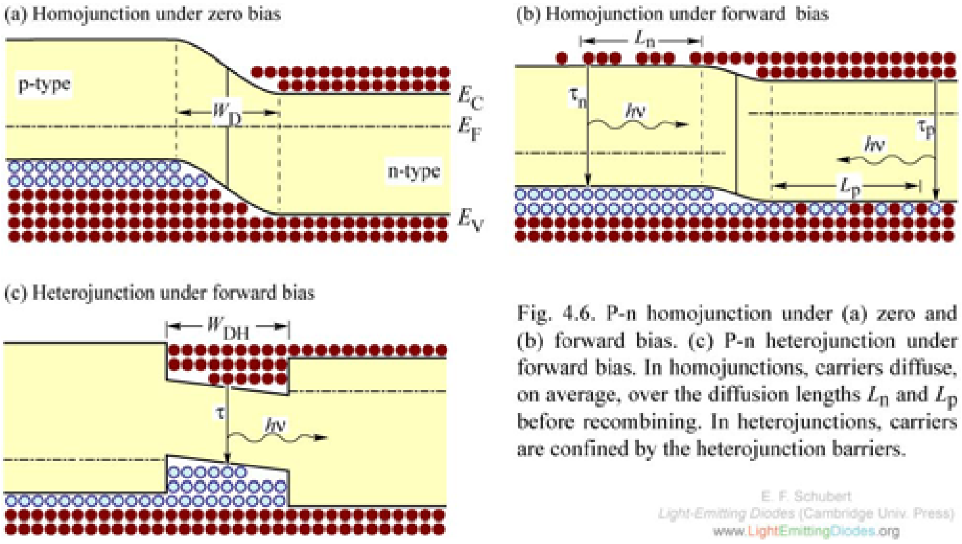

Fig. 4.6. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. (c) P-n heterojunction under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

4.

Carrier loss

이상적인 LED 구조에서는, 일단 carrier 가 active layer에 주입되면 barrier layer에 의하여 active region 안에 갇혀 있게 된다. 그러나 active region 안의 free carrier 가 Fermi-Dirac distribution을 따르기 때문에, 어떤 carrier들은 confining barrier height 이상의 energy를 가질 수 있다. 따라서 이러한 carrier들은 아래 그림에 나타난 것과 같이 barrier를 넘어서 active region 밖으로 빠져나갈 수 있다.

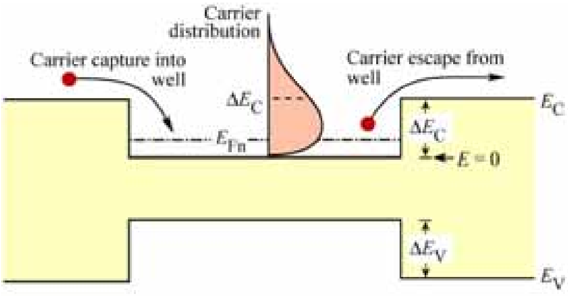

Fig. 4.9. Carrier capture and escape in a double heterostructure. Also shown is the carrier distribution in the active layer.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

Carrier overflow

Carrier overflow는 high injection current density의 경우에 일어난다. Injection current가 증가하게 되면 active region 에서의 carrier concentration이 증가하게 되고 따라서 Fermi energy가 상승하게 된다. Fermi energy 가 barrier의 top 부분까지 상승하게 되면 active region의 carrier가 아래 그림에 나타난 것과 같이 flood가 일어나게 된다. 그러므로 더 이상의 injection current density의 증가는 active region에서의 carrier concentration 증가에 기여하지 못하게 되며 optical intensity는 saturation 되게 된다.

Carrier leakage를 줄일 수 있는 방법

① electron이 hole에 비하여 diffusion coefficient가 더 크기 때문에, electron blocking layer

를 도입하여 active region 밖으로 electron이 새어나가는 것을 방지할 수 있다. 이러한 electron blocking layer는 confinement-active layer interface에 high band gap energy를 가진 물질을 사용하여 성장시킨다. 이때 아래의 그림과 같이 doped blocking layer의 경우 valence band에서 hole의 움직임이 방해 받지 않는 구조를 형성할 수 있다.

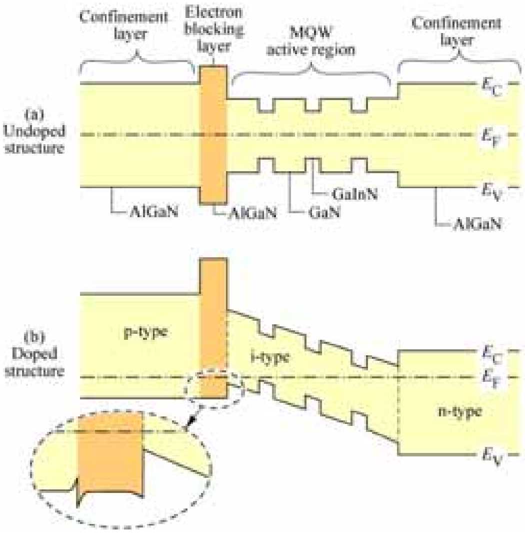

Fig. 4.12. AlGaN current-blocking layer in an AlGaN/GaN/GaInN multi quantum well structure. (a) Band diagram without doping. (b) Band diagram with doping. The Al content in the electron-blocking layer is higher than in the p-type confinement layer.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

② MQW을 형성하여 injection된 carrier가 여러 well에 들어가게 함으로써 active layer의 전체 volume을 늘릴 수 있다.

5. $$\Delta\lambda = \frac{1.8kT\lambda^2}{hc} = \frac{1.8\times(1.3807\times10^{-23})\times298\times(540\times10^{-9})^2}{(6.63\times10^{-34})\times(3\times10^{8})} = 10.86\ nm$$

6.

① 활성층에 p-doping

활성층에 n-type보다 p-type을 도핑하는 이유는 III-V 반도체 내에서 일반적으로 electron의 mobility가 hole의 mobility보다 크기 때문이다. 즉 활성층에 p-type 을 doping하는 쪽이 활성층 내에서 더 균일한 carrier의 분포를 유지하는데 유리하다. 따라서 아래 그림에 나타난 것과 같이 light p-type doping이 발광효율 향상에 더 유리하게 된다.

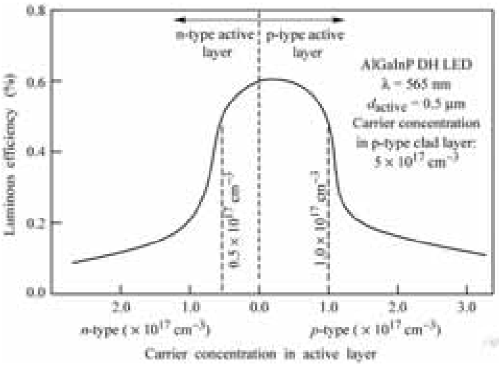

Fig. 7.4. Dependence of the luminous efficiency of an AlGaInP double heterostructure LED emitting at 565 nm on the active layer doping concentration (after Sugawara *et al.*, 1992).

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

② P-cladding을 높게 doping

아래 그림에 나타난 것과 같이 n,p-type cladding layer를 doping할 경우 n,p type에 따라 발광 효율이 개선되는 optimum band의 영역이 달라지게 된다. 그 이유는 hole에 비하여 매우 큰 electron의 diffusion length에 있다. 따라서 cladding layer도핑의 경우 p-type의 경우에 더 높은 doping concentration이 필요하다.

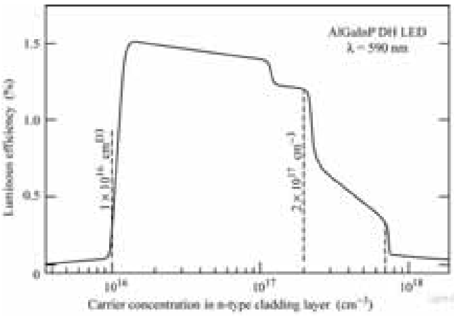

Fig. 7.7. Dependence of the luminous efficiency of an AlGaInP double heterostructure LED emitting at 565 nm on n-type confinement layer doping concentration (after Sugawara *et al.*, 1992).

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

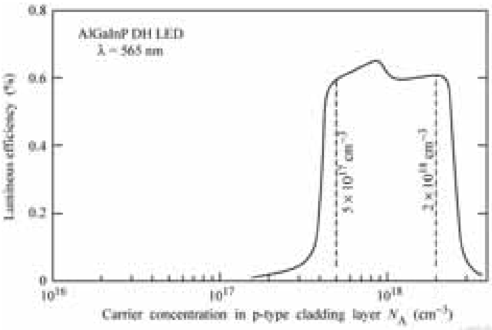

Fig. 7.8. Dependence of the luminous efficiency of an AlGaInP double heterostructure LED emitting at 565 nm on the p-type confinement layer doping concentration (after Sugawara *et al.*, 1992).

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

7.

① High energy slope of spectrum 에서 Boltzmann distribution을 가정하고 기울기를 이용하여 온도를 결정하는 방법

② Bandgap energy의 온도 의존성을 이용한 방법

③ Diode forward voltage의 온도 의존성을 이용한 방법
(상세한 내용은 6장 강의자료 참조)

세 가지 방법 중 가장 정확한 방법은 forward voltage를 이용한 방법.