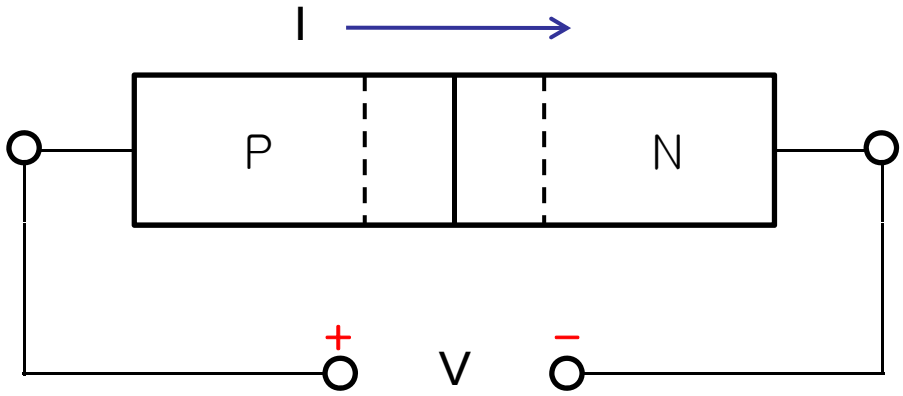
◆ 예비 사항

➢ pn junction의 rectifying 특성

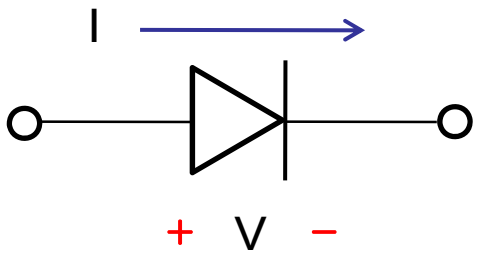
pn junction의 특성 중 가장 특징적인 점은 바로 **정류(整流, rectifying) 특성**이다.

➢ pn junction의 rectifying 특성을 이용하는 소자의 명칭이 '**diode**' 이다.

➢ 전압(V), 전류(I)의 기준 방향



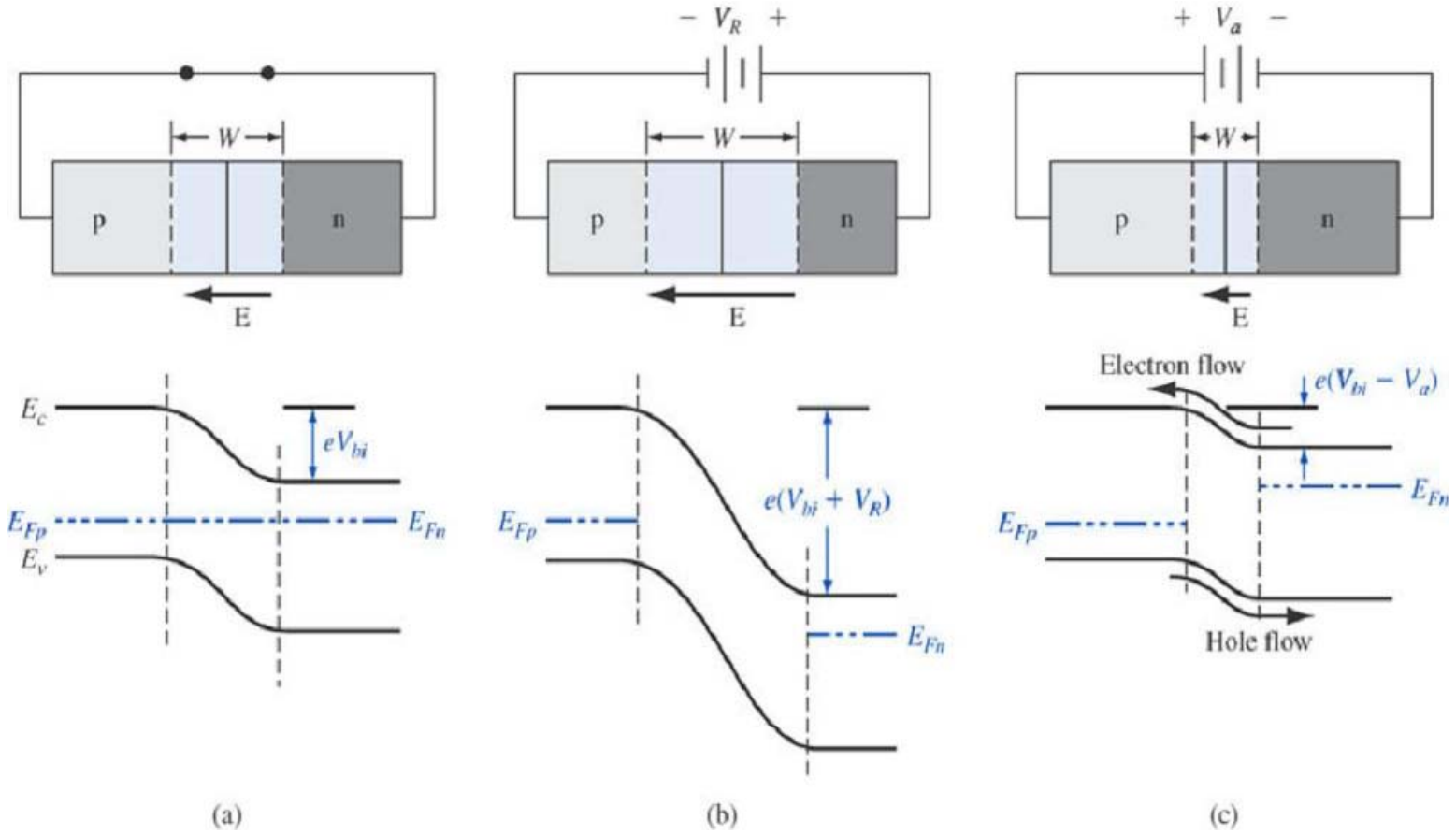
➢ 회로 심볼



8.1 pn 접합 전류

8.1.1 pn 접합 내에서의 전하 흐름의 정성적(定性的) 고찰

❖ bias 인가 시, pn junction의 물리적 상태 변화



물리량	(a)	(b)	(c)	비 고
bias	0	reverse	forward	
전위 장벽의 높이	–	증 가	감 소	
Fermi level의 위치	같음	어긋남	어긋남	반대 방향
W의 폭	–	증 가	감 소	
최대 전계의 크기	–	증 가	감 소	
carrier의 이동	–	extraction 발생	injection 발생	

8.1.2 이상적(理想的, ideal) 전류–전압 관계

❖ pn junction의 이상적 전류–전압 관계를 구하기 위한 기본 가정의 재정리

① step junction, depletion approximation(공핍영역, 중성영역)

② Maxwell-Boltzmann 근사 적용

③ low level injection

④ 총 전류는 모든 pn 구조에 걸쳐서 연속이며 일정

– 각각의 I_n, I_p는 연속 함수(continuous function)

– 각각의 I_n, I_p는 공핍 영역 내에서 일정함

8.1.3 경계 조건(boundary condition)

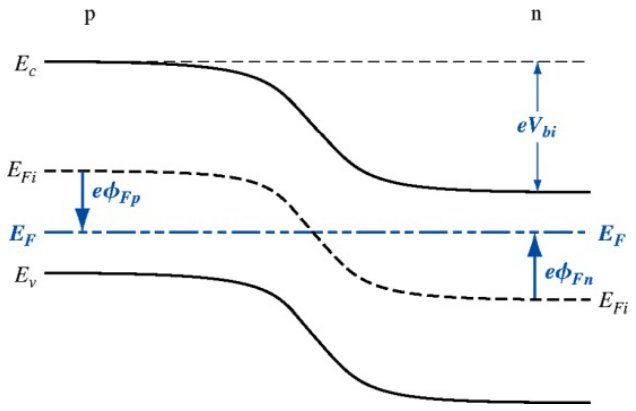
✓ carrier injection

bias(V)가 pn junction 양단에 인가되면 carrier가 상대편 영역으로 넘어가게 된다. 이것을 "**carrier injection**"이라고 한다.

✓ minority carrier injection

상대편 영역으로 넘어간 carrier들은(N-영역에서 P-영역으로 넘어 온 electron, P-영역에서 N-영역으로 넘어 온 hole) 각각 그 영역에 원래 있던 carrier(P-영역의 hole, N-영역의 electron)에 비해 그 양이 적으므로 minority carrier가 되고, 따라서 injection 현상은 "**mimority carrier injection**"이라고도 한다.

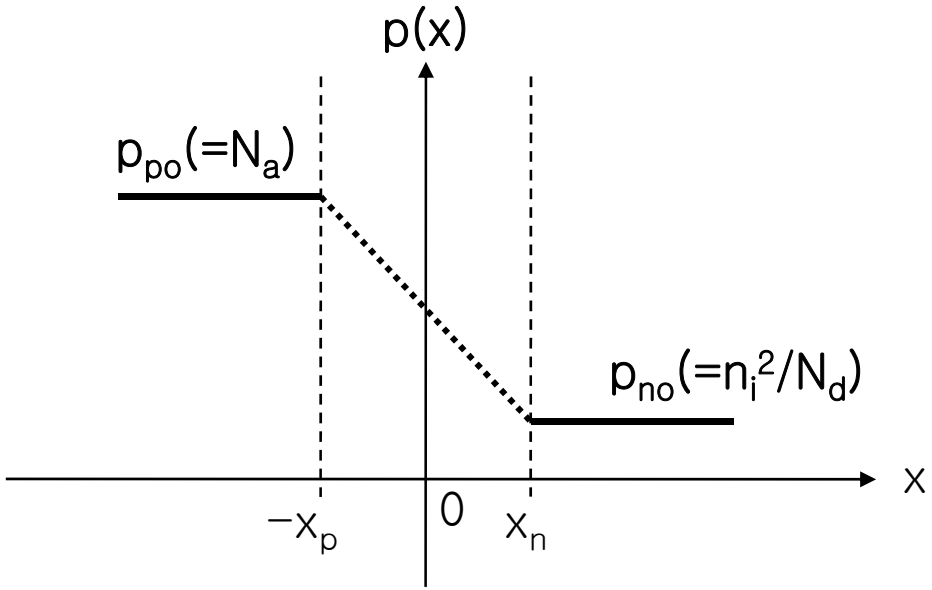
(1) zero bias의 경우(V=0) hole의 분포



$$\begin{cases} p(-x_p) = p_{po} \\ p(x_n) = p_{no} \end{cases}$$

$$V_{bi} = V_t \ln\frac{p_{po}}{p_{no}} \Rightarrow \frac{p_{po}}{p_{no}} = e^{\frac{V_{bi}}{V_t}}$$

단, $V_t \equiv \frac{kT}{e}$: thermal voltage



$$\therefore \frac{p(-x_p)}{p(x_n)} = e^{\frac{V_{bi}}{V_t}}$$

✓ electron에 대해서도 같은 방법으로, $V_{bi} = V_t \ln\frac{n_{no}}{n_{po}} \Rightarrow \frac{n_{no}}{n_{po}} = \frac{n(x_n)}{n(-x_p)} = e^{\frac{V_{bi}}{V_t}}$

(2) bias가 인가된 경우($V \neq 0$) hole의 분포

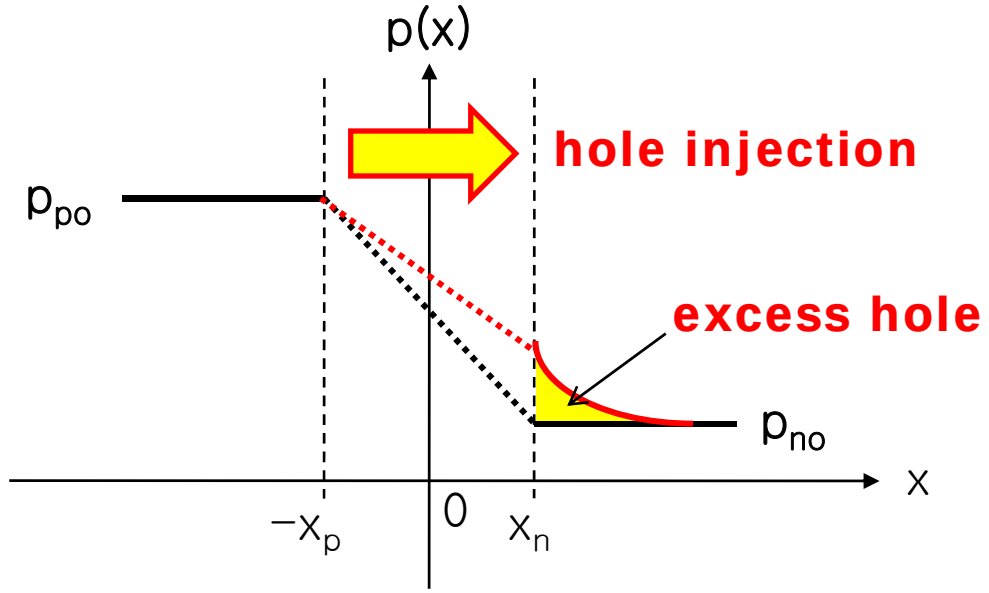
① bias의 영향 : potential barrier의 높이가 $V_{bi} \rightarrow (V_{bi} - V)$로 변화

*. bias에 의해서 W, x_p, x_n 크기가 변하지만 carrier concentration의 변화와는 무관하므로 현재의 논의에서는 무시한다.

i) forward bias($V > 0$) 일 때

-. $V_{bi} > (V_{bi} - V)$, 즉 barrier 높이가 감소

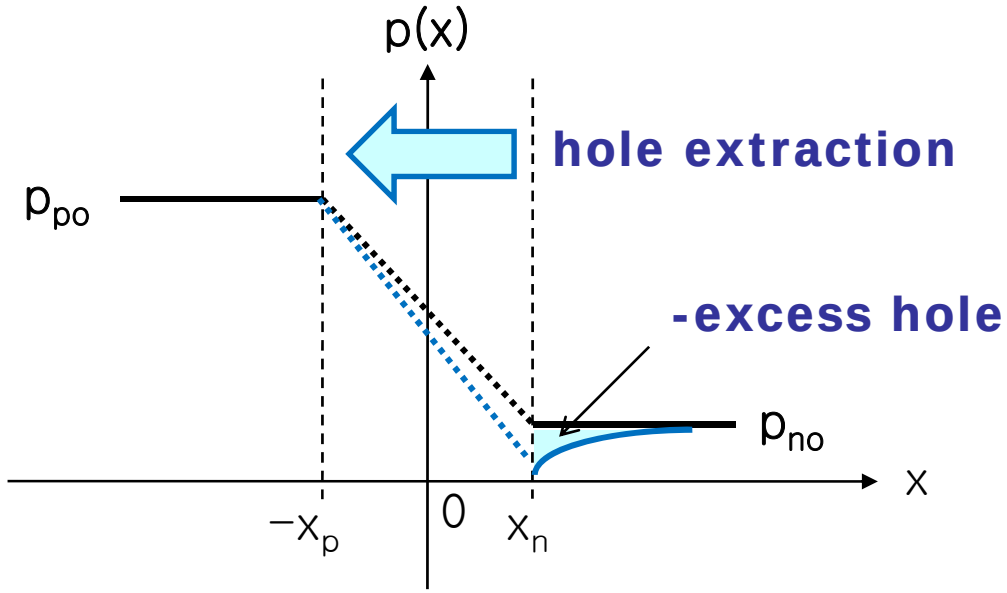
-. p-영역 ⇒ n-영역으로 hole이 inject 됨



ii) reverse bias(V < 0) 일 때

-. $V_{bi} < (V_{bi} - V)$, 즉 barrier 높이가 증가

-. p-영역 ← n-영역으로 hole이 extract 됨



✓ carrier 종류에 따른 injection, extraction의 영향

majority carrier : 거의 변화 없음

minority carrier : 크게 변함

"low level injection"

② bias와 carrier concentration의 관계

$$\frac{p(-x_p)}{p(x_n)} = e^{\frac{e(V_{bi}-V)}{kT}}$$ 에서,

(좌변) : $$\frac{p(-x_p)}{p(x_n)} = \frac{p_{po}}{p(x_n)} = \frac{p_{no}e^{\frac{eV_{bi}}{kT}}}{p(x_n)}$$

↑ majority carrier는 거의 변화하지 않음

(우변) : $$e^{\frac{e(V_{bi}-V)}{kT}} = e^{\frac{eV_{bi}}{kT}} e^{-\frac{eV}{kT}}$$

(좌변) = (우변) : $$\frac{p_{no}e^{\frac{eV_{bi}}{kT}}}{p(x_n)} = e^{\frac{eV_{bi}}{kT}} e^{-\frac{eV}{kT}}$$

$$\therefore \frac{p(x_n)}{p_{no}} = e^{\frac{eV}{kT}}$$

$V > 0, \quad p(x_n) > p_{no}$: injection(P→N)

$V = 0, \quad p(x_n) = p_{no}$: equilibrium

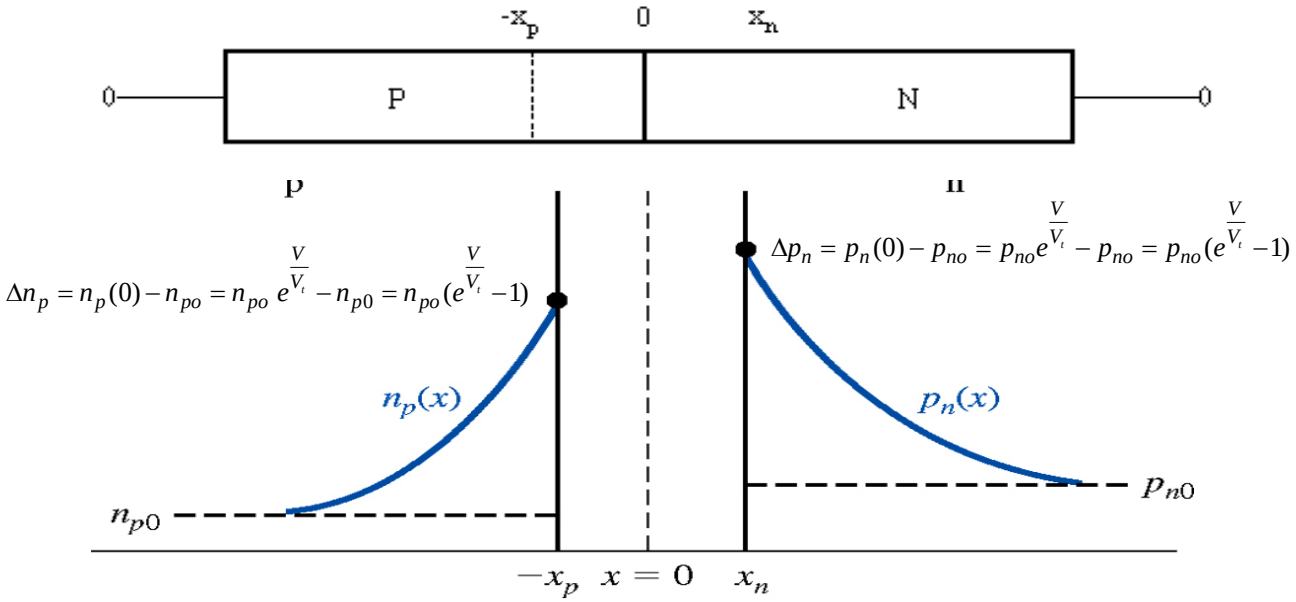
$V < 0, \quad p(x_n) < p_{no}$: extraction(P←N)

✓ electron으로 고찰하면

$$n(-x_p) = \Delta n_p = n_{po}\, e^{\frac{eV}{kT}}$$

8.1.4 소수캐리어(minority carrier) 분포

✓ injection 결과로 minority carrier 분포가 공간적으로 불균일해짐.



✓ diffusion eq.의 결과부터 excess minority carrier의 공간적인 분포는

$$\delta p_n(x) = p_n(x) - p_{no} = \Delta p_n\, e^{\frac{x_n - x}{L_p}} = p_{no}(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)\, e^{\frac{x_n - x}{L_p}}$$

단, $L_p^2 = D_p \tau_{po}$, $L_n^2 = D_n \tau_{no}$

(diffusion length)

$$\delta n_p(x) = n_p(x) - p_{no} = \Delta n_p\, e^{\frac{x_p + x}{L_n}} = n_{po}(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)\, e^{\frac{x_p + x}{L_n}}$$

8.1.5 이상적인 pn 접합 전류

i) $x = x_n$에서 hole 전류밀도

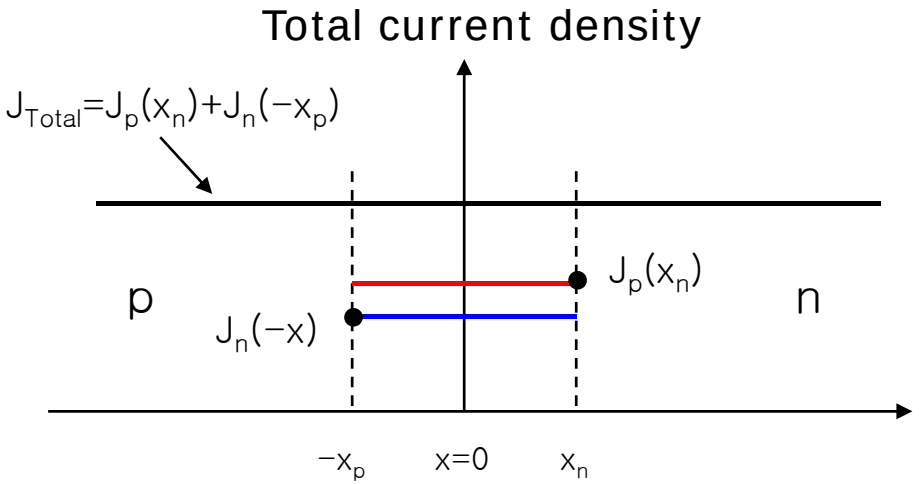
$$J_p(x_n) = -eD_p \left.\frac{dp_n(x)}{dx}\right|_{x=x_n}$$

$$J_p(x_n) = e\frac{D_p}{L_p} p_{no}(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)$$

ii) $x = -x_p$에서 electron 전류밀도

$$J_n(-x_p) = eD_n \left.\frac{dn_p(x)}{dx}\right|_{x=-x_p}$$

$$J_n(-x_p) = e\frac{D_n}{L_n} n_{po}(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)$$



iii) 총 전류밀도

-. 각각의 electron전류와 hole전류는 공간전하영역에서 일정하다고 가정한다.

(transition region내에서의 recombination을 무시)

그러면, $-x_p$에서의 hole전류는 x_n에서의 hole전류, $J_p(x_n)$, 와 같다.

-. 따라서, $-x_p$에서의 electron 전류와 x_n에서의 hole전류를 합하면 전체 전류가 된다.

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n) = J_s(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)$$

단, $J_s \equiv e\left(\frac{D_p}{L_p} p_{no} + \frac{D_n}{L_n} n_{po}\right)$: reverse saturation current density(역포화전류밀도)

❖ 총 전류(3차원 구조 고려)

-. diode(pn junction)의 단면적이 A 일 때, $I = A \times J$ 이므로

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)$$: diode equation

단, $I_s \equiv eA\left(\frac{D_p}{L_p} p_{no} + \frac{D_n}{L_n} n_{po}\right)$: reverse saturation current(역포화전류)

❖ pn junction의 기본 I-V 특성에 관한 종합 정리

<1> 수식적 표현

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_t}} - 1)$$: diode equation

① V<0 일 때(reverse bias) : $I = -I_s$

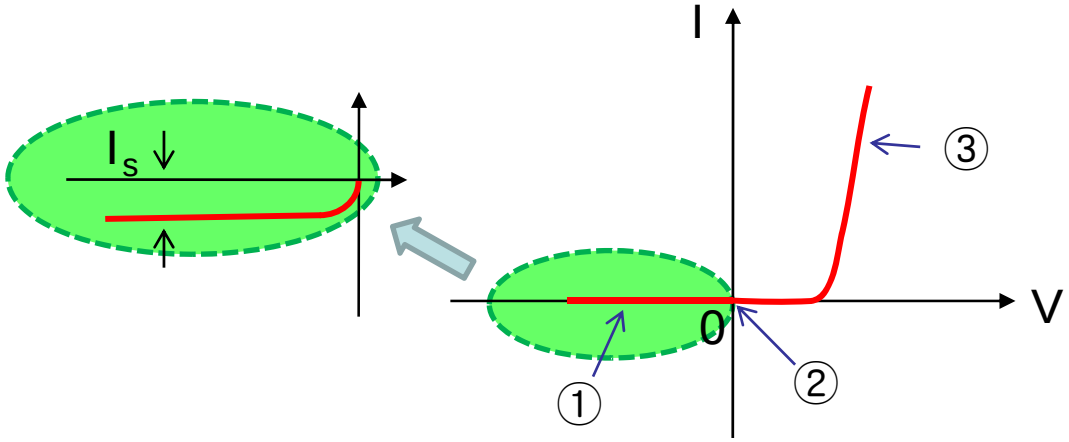
전류는 양단에 인가된 bias의 크기에 무관하게 N → P로 흐르며 그 크기는 일정

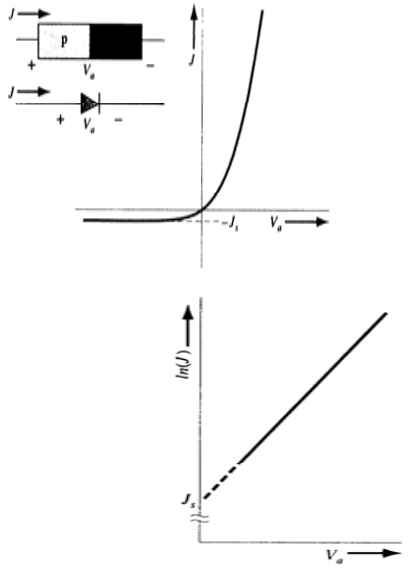
② V=0 일 때(equilibrium) : $I = 0$

③ V>0 일 때(forward bias) : $I \cong I_s\, e^{\frac{V}{V_t}}$

forward bias의 크기에 따라 exponentially 증가하며, P → N으로 흐름

<2> I-V 특성 그래프

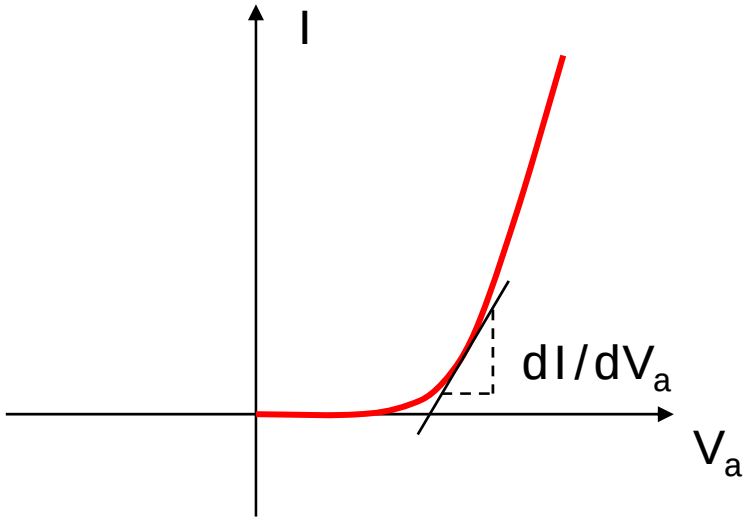




8.2 pn 접합의 소신호 모델

8.2.1 확산저항

(1) r_d : 확산저항(diffusion resistance)



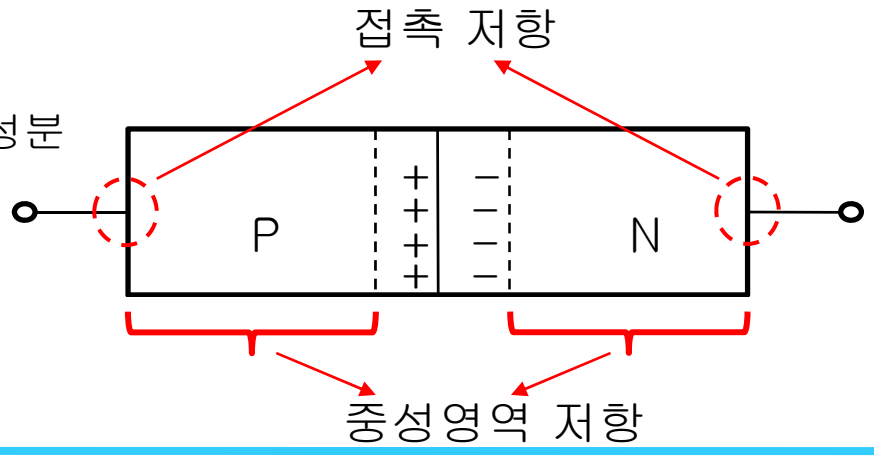
$$r_d = \frac{dV_a}{dI} = \left[\frac{dI}{dV_a}\right]^{-1}$$

$$I = I_s(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1) \cong I_s\, e^{\frac{eV_a}{kT}}$$

$$\therefore \quad r_d = \frac{kT}{eI} = \frac{V_t}{I}$$

(2) r_s : 직렬저항(series resistance)

✓ 직렬저항 ⇒ 접촉저항+ 중성영역 저항 성분

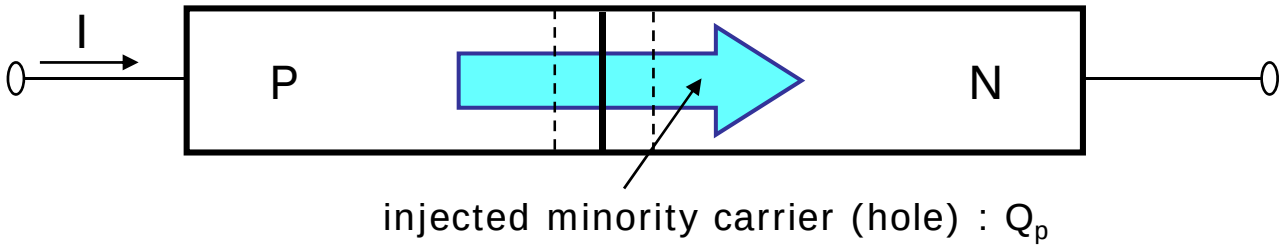


8.2.2 소신호 어드미턴스(small signal admittance)

(1) C_d : 확산 커패시턴스(diffusion capacitance)

- −. 상대편 영역으로 inject되는 minority carrier에 의한 charge storage effect로 인해서 전류 변화와 전압 변화에 시간차가 생기게 되므로 이에 의한 capacitance
- −. forward bias 시에 우세하게 나타남
- −. 'charge storage capacitance' 라고도 함

(2) C_d 계산



$$C_d \equiv \frac{dQ_p}{dV_a} \quad , \quad Q_p \equiv e\,A\,L_p\,\Delta p_n = e\,A\,L_p\,p_{no}\,e^{\frac{eV_a}{kT}}$$

$$\therefore \quad C_d \equiv \frac{e^2}{kT} A L_p\,p_{no}\,e^{\frac{eV_a}{kT}}$$

한편,

$$Q_p \equiv I\,\tau_p$$

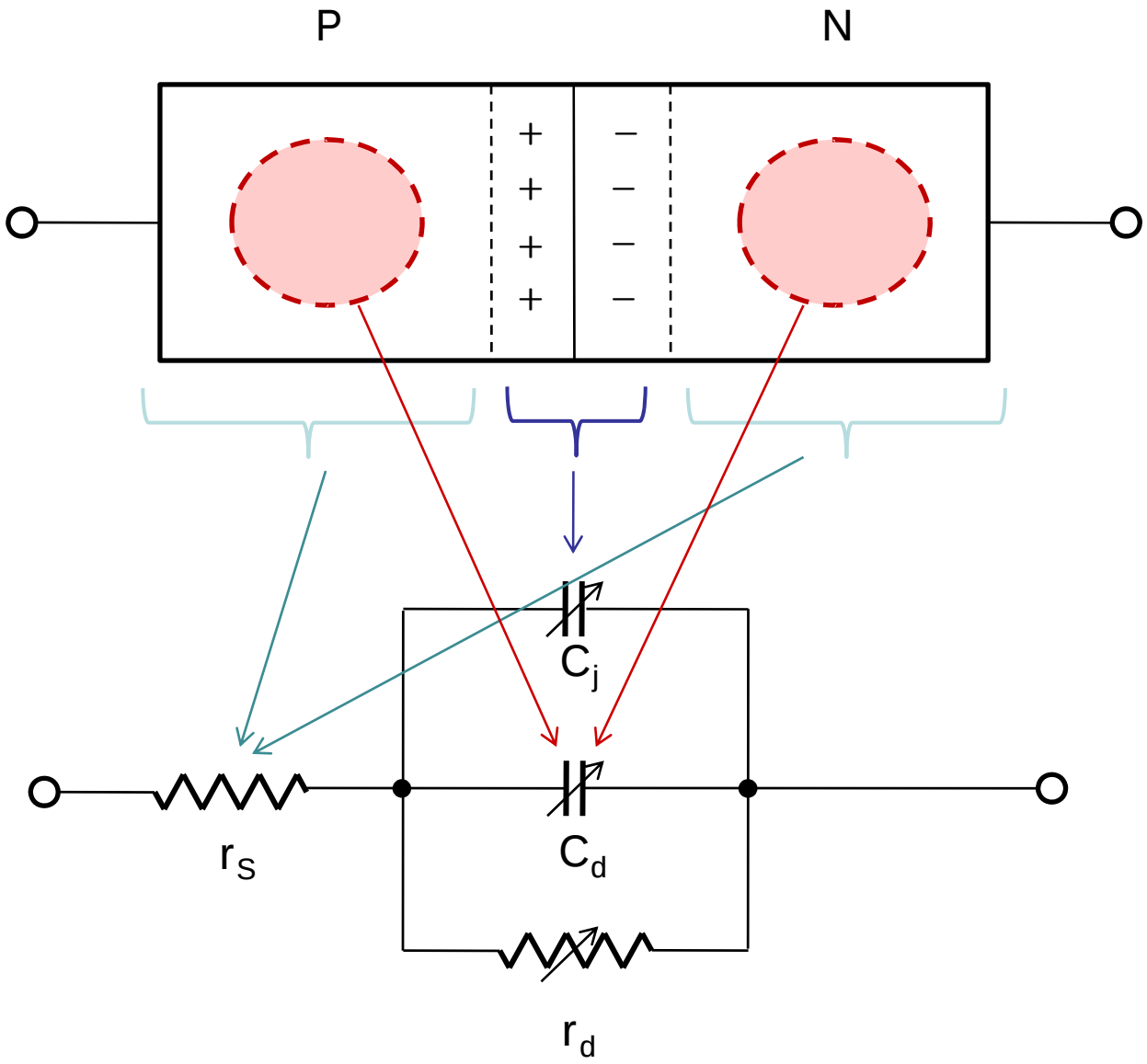
로 표현할 수 있으므로,

$$\therefore \quad C_d \equiv \frac{e}{kT} I\tau_p$$

이 결과식에서

① $C_d \propto \tau_p$ 이므로 minority carrier lifetime을 줄이면 C_d 가 감소

② $C_d \propto I$ 이므로 전류의 크기가 작을 때 C_d 가 작음

* high speed switching 특성이 좋은 diode ?

8.2.3 소신호 등가회로