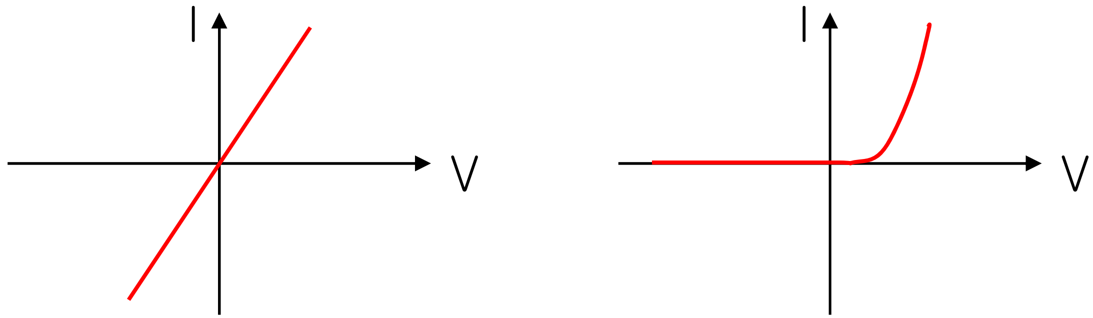
7 장 pn 접합(接合, junction)

❖ 전기적 특성에 따른 contact(접촉, 接觸)의 종류

(1) Ohmic contact(저항성 접촉) : Ohm의 법칙을 만족시키는 I-V 특성을 갖는 접촉

(2) Rectifying contact(정류성 접촉) : 접촉 양단에 인가된 전압의 극성에 따라 I-V 특성이 현저히 다른 접촉



❖ 접합(junction)의 종류

(1) 반도체-반도체 접합

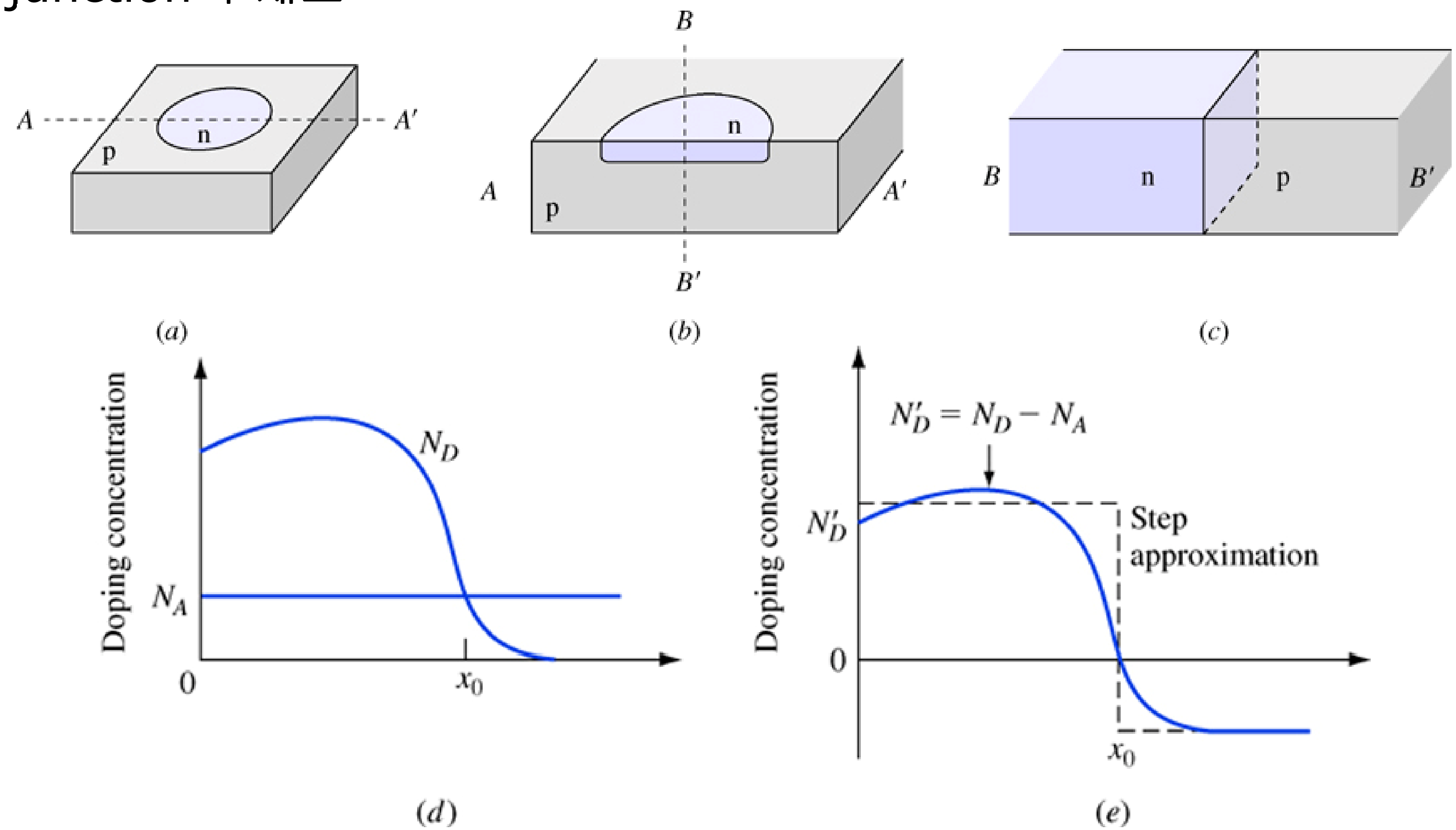
-. 同種 접합(homojunction) : 같은 반도체 재료에서 서로 다르게 도핑된 두 개의 영역 사이의 접합 (예 : Si-Si)

-. 異種 접합(heterojunction) : 다른 종류의 반도체 재료 사이의 접합 (예 : Si-Ge)

(2) 금속-반도체 접합(metal-semiconductor junction) : 금속과 반도체 사이의 접합

kit 국립금오공과대학교 Kumoh National Institute of Technology

❖ pn junction의 제조



* pn junction은 하나의 single crystal에 각기 다른 불순물을 doping시켜 두 불순물 간의 경계를 만들어줌으로써 얻어진다. 즉, p-type 불순물과 n-type 불순물간의 경계인 metallurgical junction (금속학적 접합)이 pn junction이 되는 것이다.

* pn junction을 이론적으로 해석할 때에는 p과 n-type을 따로 준비하여 붙이는 것처럼 설명한다.

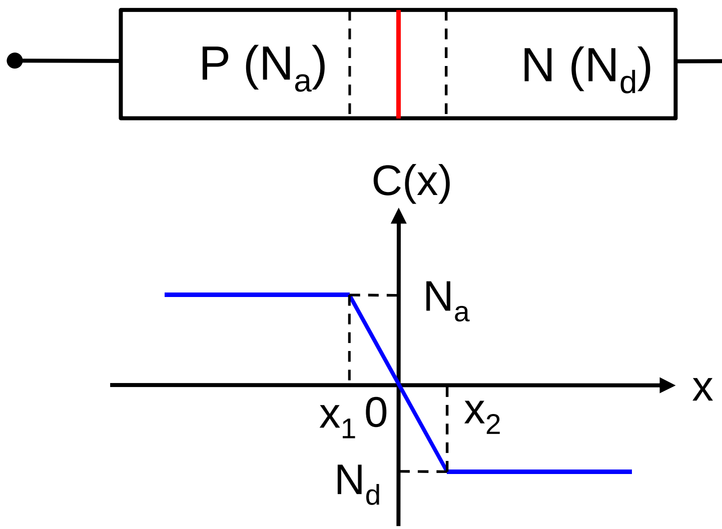
7.1 pn 접합의 기본 구조

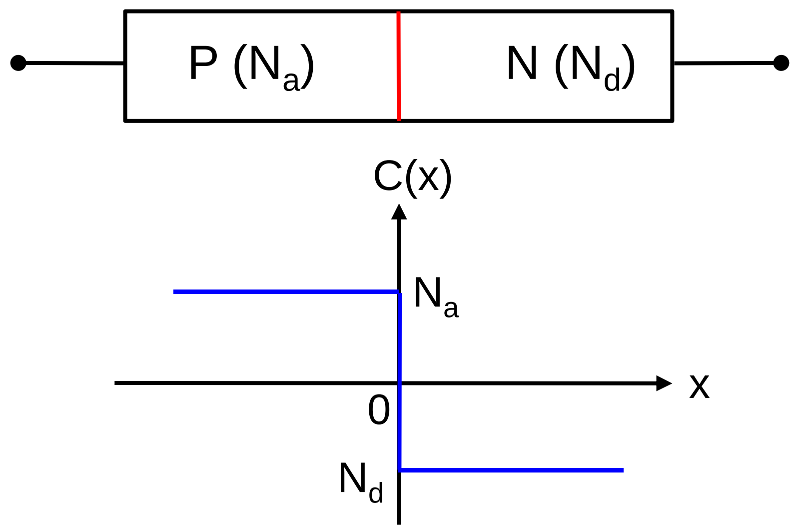
➢ 불순물의 공간적 분포에 따른 접합의 분류

(1) 경사형 접합(傾斜形 접합, graded junction) : 불순물 분포가 서서히 변함

(2) 계단형 접합(step junction) : 불순물 분포가 급격히 변함.

'abrupt junction'이라고도 함.





- $x \le x_1$: $C(x) = N_a$ → 일정
- $x_1 \le x \le x_2$: $C(x) = f(x)$ → x(위치)의 함수
- $x_2 \le x$ 일 때: $C(x) = N_d$ → 일정

- $x \le 0$: $C(x) = N_a$ → 일정
- $0 \le x$: $C(x) = N_d$ → 일정

7.2 제로 인가 바이어스

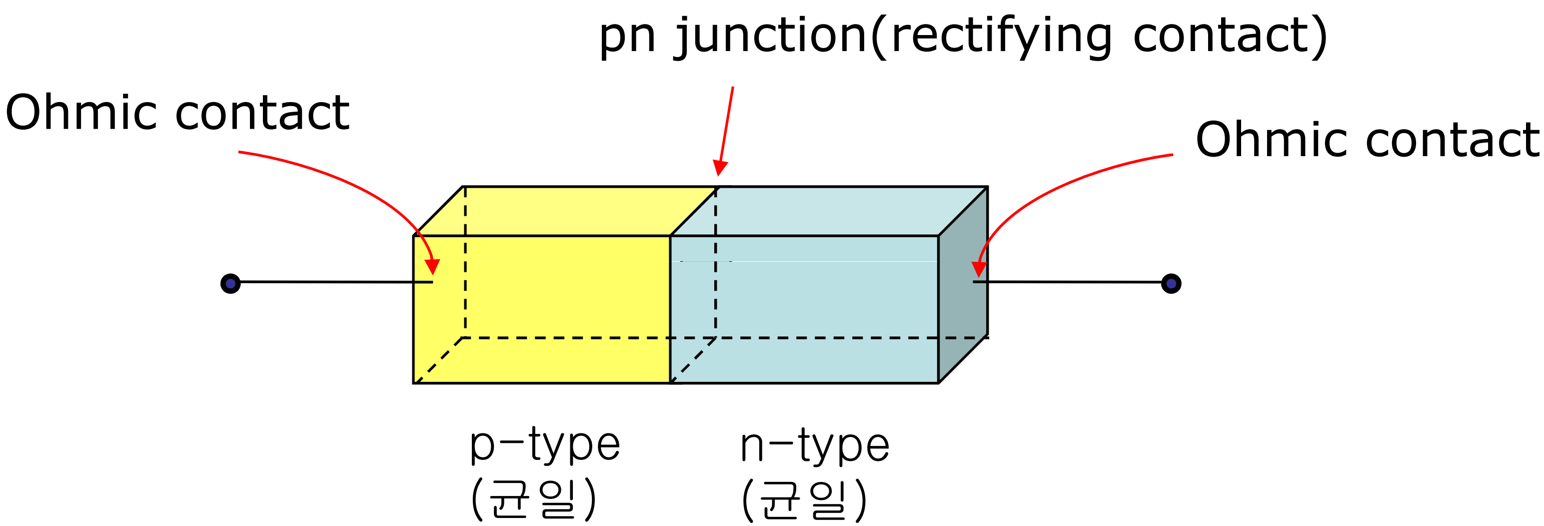
❖ ‘zero 인가 바이어스’ = ‘equilibrium 상태’

❖ pn junction의 수학적 해석을 위한 기본 가정

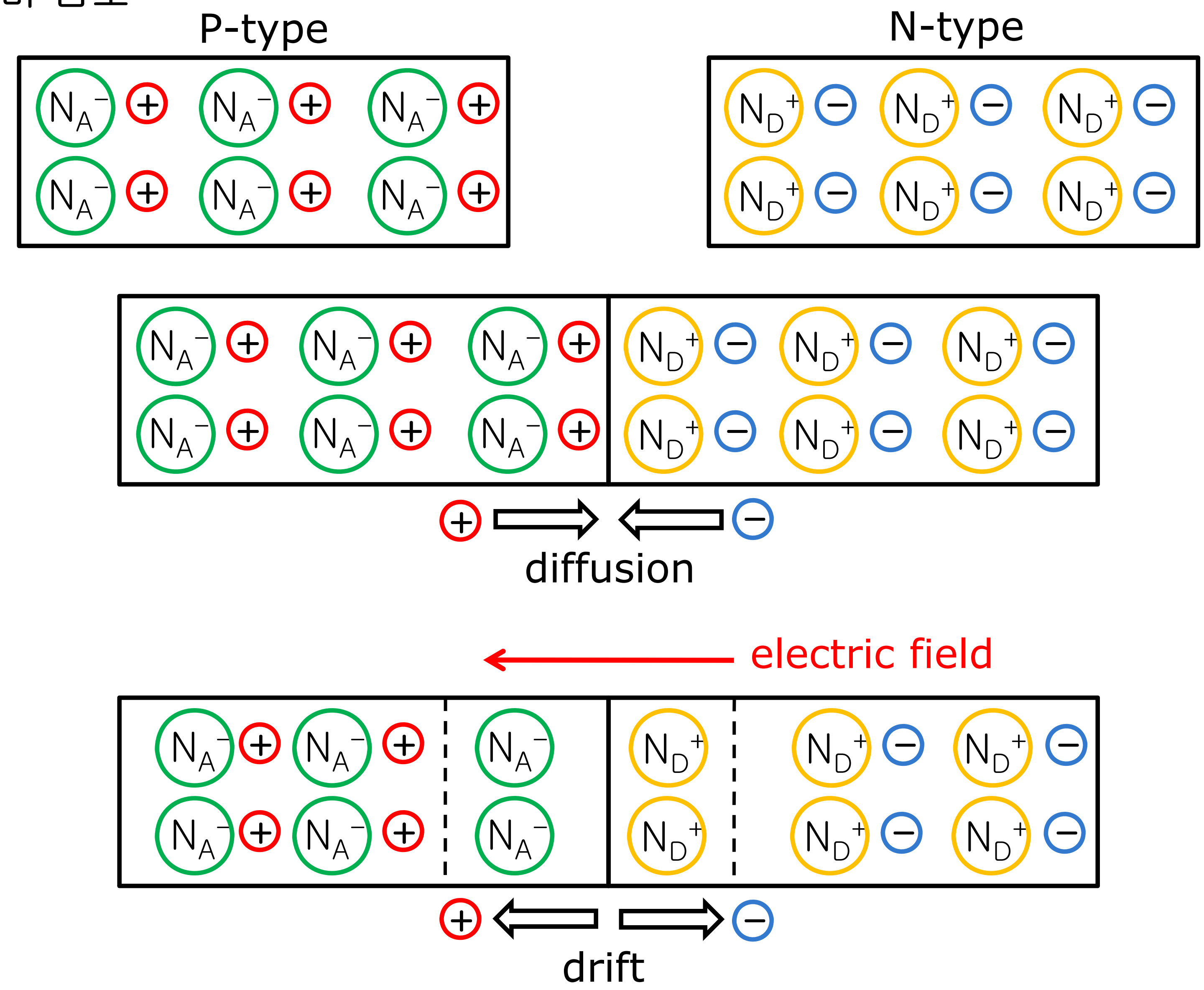
i) 실제 구조의 pn junction을 ‘one-dimensional model’로 간략화

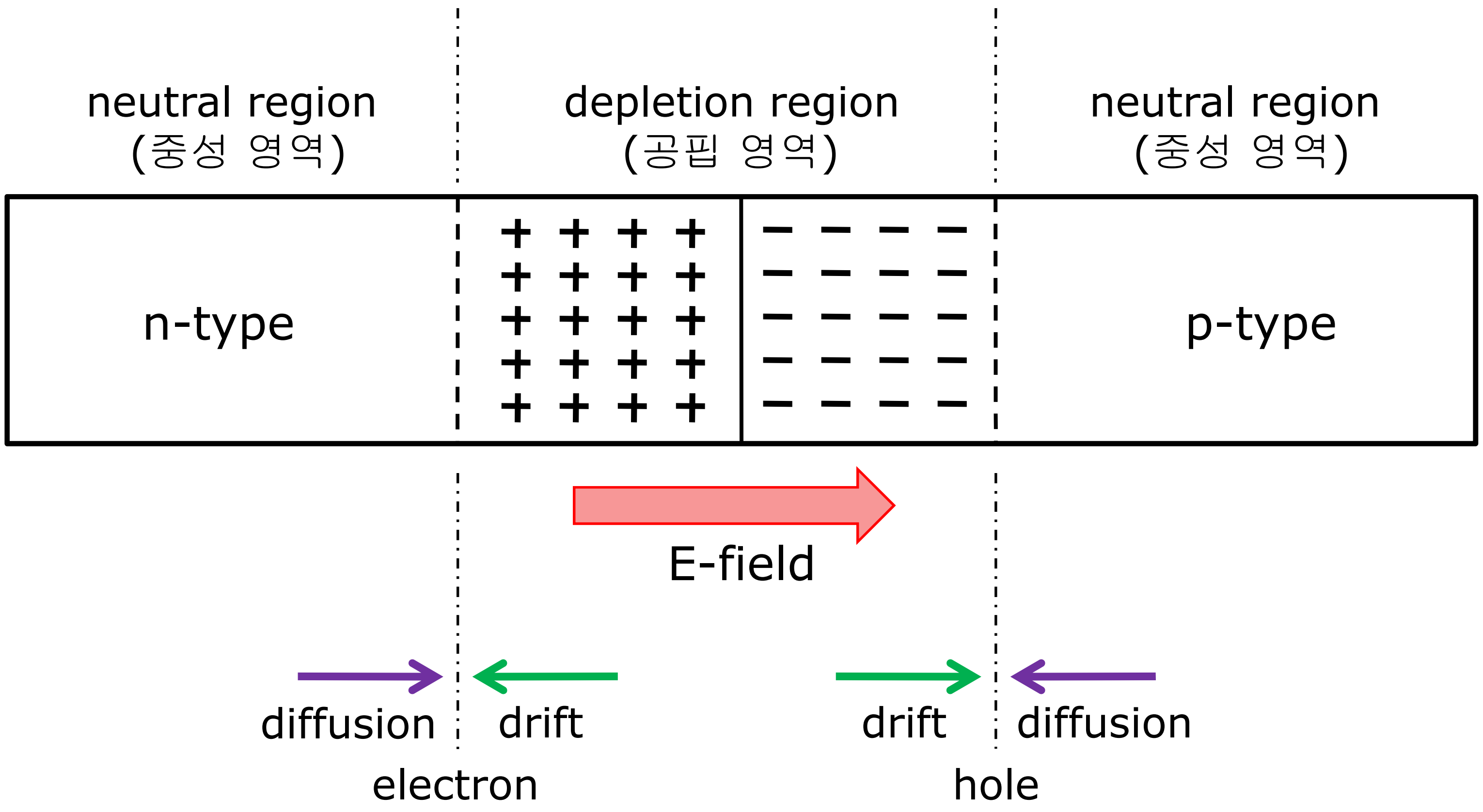
- 각 region은 homogeneous하며 그 경계는 step junction을 이루고 있음
- 전류의 흐름은 한 개의 방향으로만 제한
  (해석의 편의를 위해 1차원 경우만 고려)

ii) 각 region의 끝에는 Ohmic contact으로 구성



❖ 예비 검토





(1) neutral region : +, - charge의 총량이 zero로 전체적으로 전기적 중성이 영역

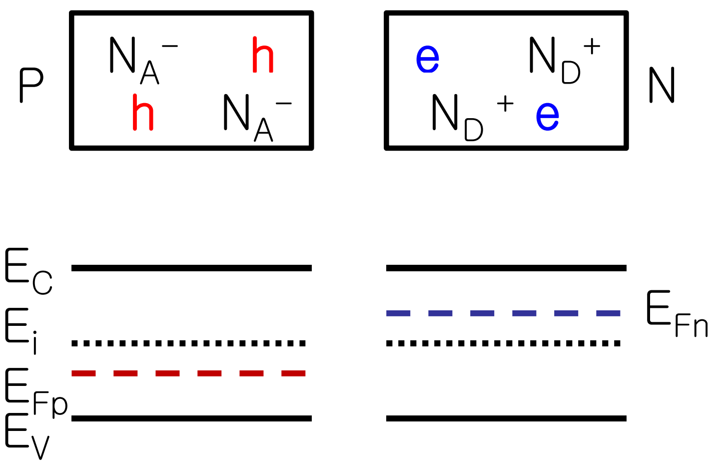
(2) depletion region : electron, hole이 없어져 ion화된 불순물들만 남아있는 영역

space charge region(공간전하영역) 또는 transition region

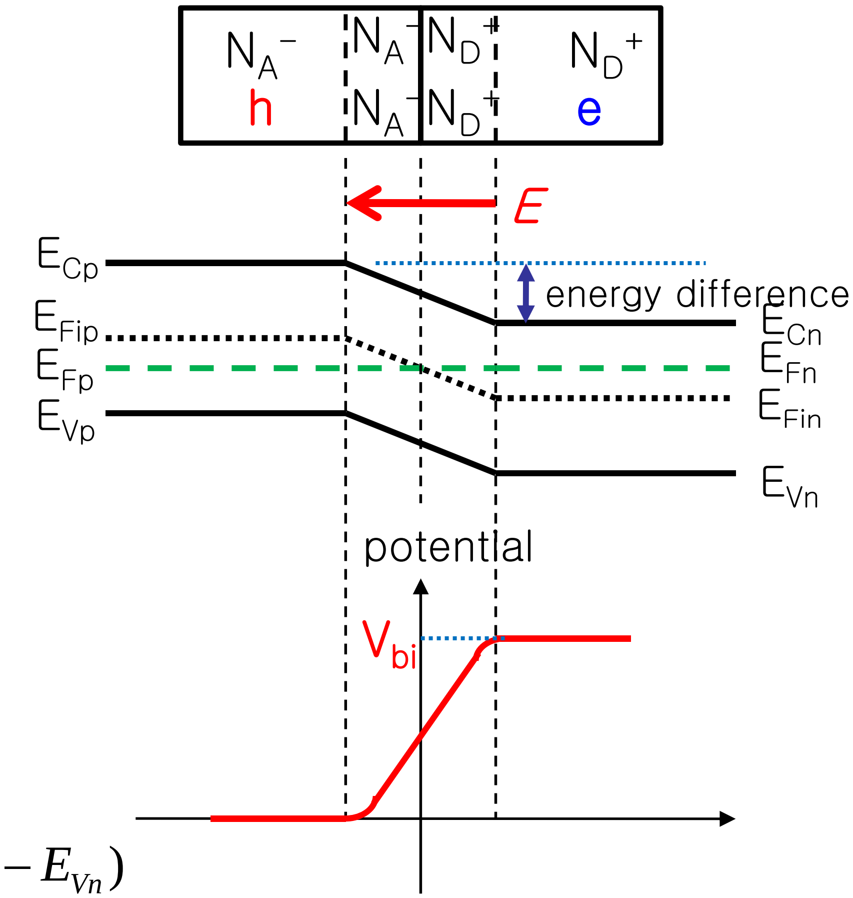
(遷異영역)이라고도 함

7.2.1 내부 장벽 (Built-in potential barrier)

<접합 생성 前>



<접합 생성 後>



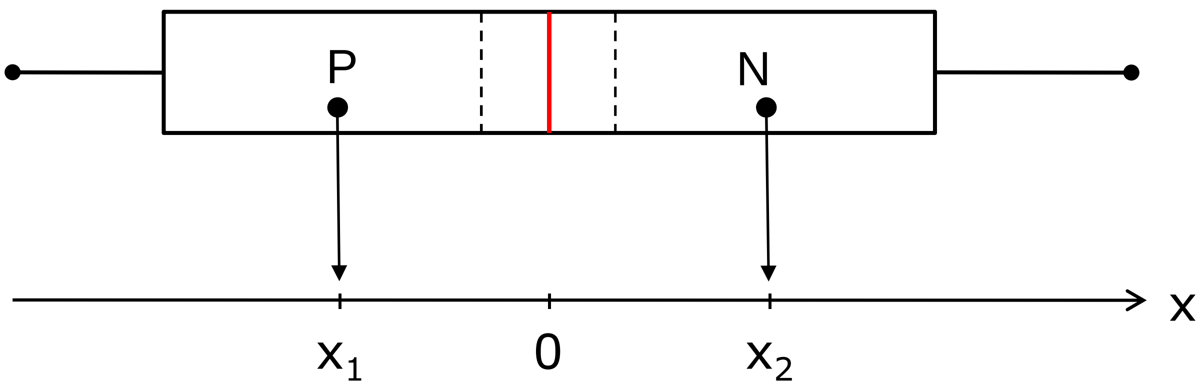
"접촉전위차(contact potential)" 또는
"내부형성전압(built-in potential)"

$$V_{bi} = \frac{1}{e}(E_{Cp} - E_{Cn}) = \frac{1}{e}(E_{Fip} - E_{Fin}) = \frac{1}{e}(E_{Vp} - E_{Vn})$$

$$= \frac{1}{e}\{(E_{Fip} - E_{Fp}) + (E_{Fn} - E_{Fin})\}$$

* (비교) "cut-in voltage"

❖ contact potential 계산



$$p_{p0} = N_a \qquad n_{n0} = N_d$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_a} \qquad p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

단, x_1, x_2는 중성영역 내의 임의의 점

평형 상태에서 모든 전류는 0이므로

$$J_p(x) = e\mu_p p(x)E(x) - eD_p \frac{dp(x)}{dx} = 0$$

따라서,

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

또, $E(x) = -\frac{d\phi}{dx}$ 이므로

$$-\frac{d\phi}{dx} = \frac{D_p}{\mu_p}\frac{1}{p(x)}\frac{dp(x)}{dx} = \frac{kT}{e}\frac{1}{p(x)}\frac{dp(x)}{dx}$$

$$-d\phi = \frac{kT}{e}\frac{1}{p(x)}dp(x)$$

$$-\int_{\phi_p}^{\phi_n} d\phi = \frac{kT}{e}\int_{p_{p0}}^{p_{n0}} \frac{1}{p(x)}dp(x)$$

단, $\phi_p = \phi(x_1)$, $\phi_p = \phi(x_2)$

$$-(\phi_n - \phi_p) = \frac{kT}{e}\ln p(x)\Big|_{p_{p0}}^{p_{n0}} = \frac{kT}{e}\ln\frac{p_{n0}}{p_{p0}}$$

따라서 contact potential, V_{bi}, 는

$$V_{bi} \equiv (\phi_n - \phi_p) = -\frac{kT}{e}\ln\frac{p_{n0}}{p_{p0}} = \frac{kT}{e}\ln\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_a}{n_i^2/N_d}$$

$$\therefore \quad \boxed{V_{bi} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_a N_d}{n_i^2}}$$

* (electron으로 계산해도 같은 결과)

❖ carrier concentration과 contact potential과의 관계

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_{po}}{p_{no}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}}$$

$$\therefore \quad p_{no} = p_{po} \exp(-\frac{eV_{bi}}{kT})$$

$$n_{po} = n_{no} \exp(-\frac{eV_{bi}}{kT})$$

* $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$: 각 중성영역에서 Mass-Action Law 성립

7.2.2 전계(electric field)

❖ Gauss의 법칙 : $\nabla \cdot D = \rho(x)$ * 단, D : electric displacement

ρ(x) : electric charge density

$$D = \varepsilon E$$

$$\therefore \quad \frac{dE}{dx} = \frac{1}{\varepsilon}\rho(x)$$

그런데 반도체 시료 내의 총 charge는

$$\rho(x) = e(p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x))$$

로 주어지므로

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e}{\varepsilon_s}\left[p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x)\right]$$

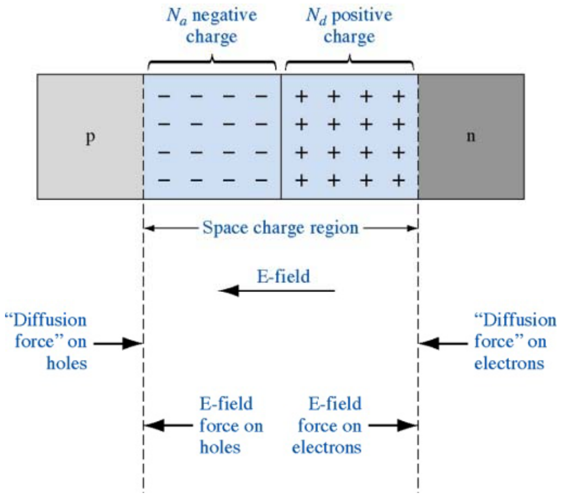
❖ Poisson's equation의 유도

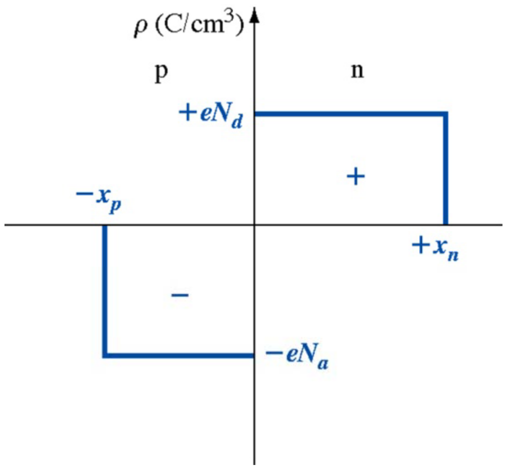
$$E = -\frac{d\phi}{dx}$$

$$\boxed{\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon_s}\left[p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x)\right]}$$

: 'Poisson's equation'

❖ E-field의 계산





$$\rho(x) = e\left[p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x)\right]$$

i) $x \le -x_p$, $x \ge x_n$ 일 때

중성영역이므로 $p(x) = N_a^-$, $n(x) = N_d^+$

$$\rho(x) = 0$$

$$\boxed{\therefore \quad E(x) = 0}$$

kit 국립금오공과대학교
Kumoh National Institute of Technology

ii) $-x_p < x < 0$ 일 때

$p = n = 0$ (∵ depletion approximation),

$N_d^+ = 0$ (∵ p-type) 이므로

$$\rho(x) = -eN_a$$

$$\therefore \quad dE = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a dx$$

$$\int_{E(-x_p)}^{E(x)} dE = -\int_{-x_p}^{x} \frac{e}{\varepsilon_s} N_a dx$$

$$E(x) - E(-x_p) = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a (x + x_p)$$

그리고, $E(-x_p)=0$ 이므로,

$$\boxed{\therefore \quad E(x) = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a (x + x_p)}$$

iii) $0 < x < x_n$ 일 때

$$\rho(x) = eN_d$$

$$\int_{E(0)}^{E(x)} dE = \int_0^x \frac{e}{\varepsilon_s} N_d \, dx$$

$$E(x) = \frac{e}{\varepsilon_s} N_d x + E(0)$$

ii)의 결과에서

$$E(0) = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a x_p$$

$$\therefore \quad E(x) = \frac{e}{\varepsilon_s} N_d x - \frac{e}{\varepsilon_s} N_a x_p = \frac{e}{\varepsilon_s} N_d \left(x - \frac{N_a}{N_d} x_p\right)$$

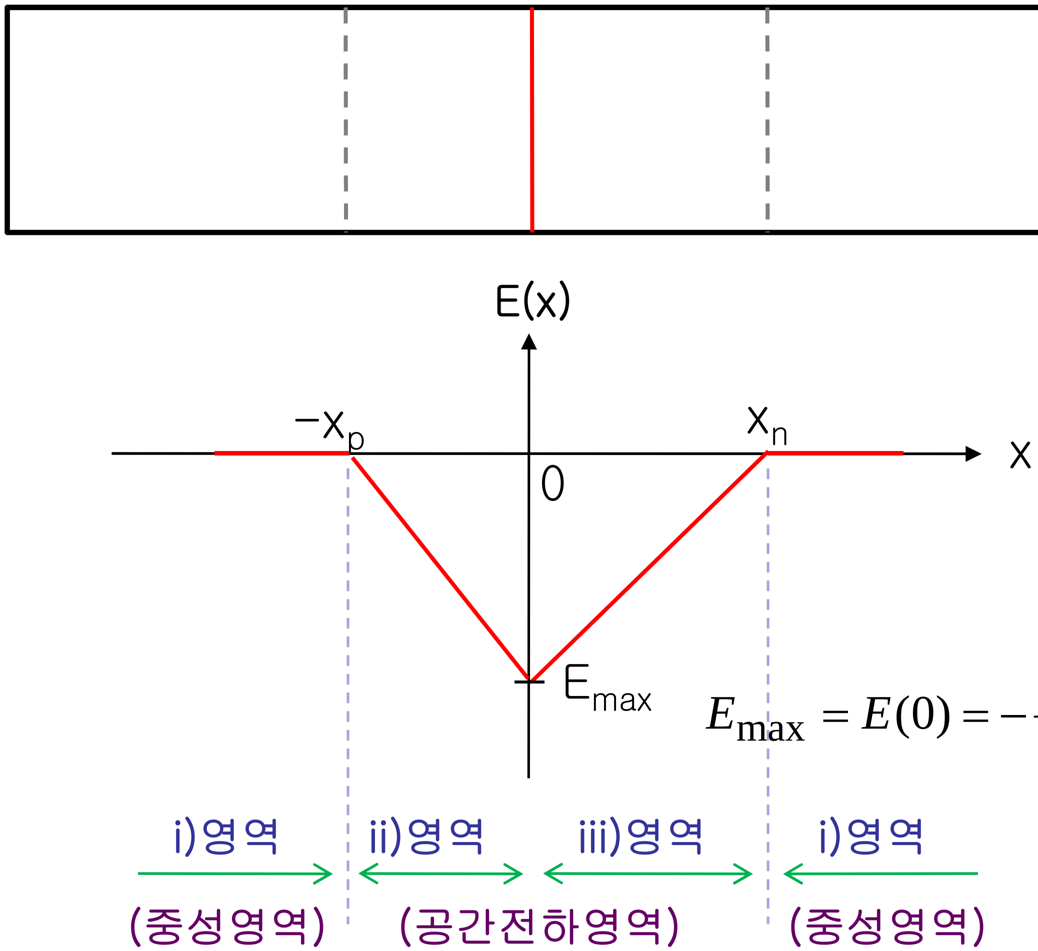
따라서,

$$\boxed{\therefore \quad E(x) = \frac{e}{\varepsilon_s} N_d (x - x_n)}$$

그리고,

$$E(x_n) = \frac{e}{\varepsilon_s} N_d (x_n - x_n) = 0$$

위 i), ii), iii)의 결과를 종합하여 그래프로 내타내면 아래와 같다.



$$E_{\max} = E(0) = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a x_p = -\frac{e}{\varepsilon_s} N_d x_n \equiv E_0$$

kit 국립금오공과대학교 Kumoh National Institute of Technology

❖ E-field를 이용한 built-in potential의 계산

$$E = -\frac{d\phi}{dx} \quad \text{이므로} \quad d\phi = -Edx$$

$$\int_{\phi(-x_p)}^{\phi(x_n)} d\phi = -\int_{-x_p}^{x_n} E(x)dx$$

$$(\text{우변}) = -\int_{-x_p}^{x_n} E(x)dx$$

$$= -\left[-\int_{-x_p}^{0} \{-\frac{e}{\varepsilon_s} N_a (x + x_p)\}dx + \int_{0}^{x_n} \{\frac{e}{\varepsilon_s} N_d (x - x_n)\}dx \right]$$

$$= -\frac{e}{\varepsilon_s} N_a \int_{-x_p}^{0} (x + x_p)dx - \frac{e}{\varepsilon_s} N_d \int_{0}^{x_n} (x - x_n)dx$$

$$= \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}(N_a x_p^2 + N_d x_n^2)$$

$$(\text{좌변}) = \int_{\phi(-x_p)}^{\phi(x_n)} d\phi = \phi(x_n) - \phi(-x_p)$$

$$\equiv V_{bi}$$: Built-in potential

그런데, $x_pN_a = x_nN_d$, $W \equiv x_p + x_n$ 에서

$$\therefore \quad V_{bi} = \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}(N_a x_p^2 + N_d x_n^2) = \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}N_a x_p(x_p + x_n)$$

따라서,

$$\therefore \quad V_{bi} = \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}N_a x_p W = \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}N_d x_n W$$

또 다른 표현으로

$$x_p = W - x_n, \quad x_p N_a = x_n N_d$$

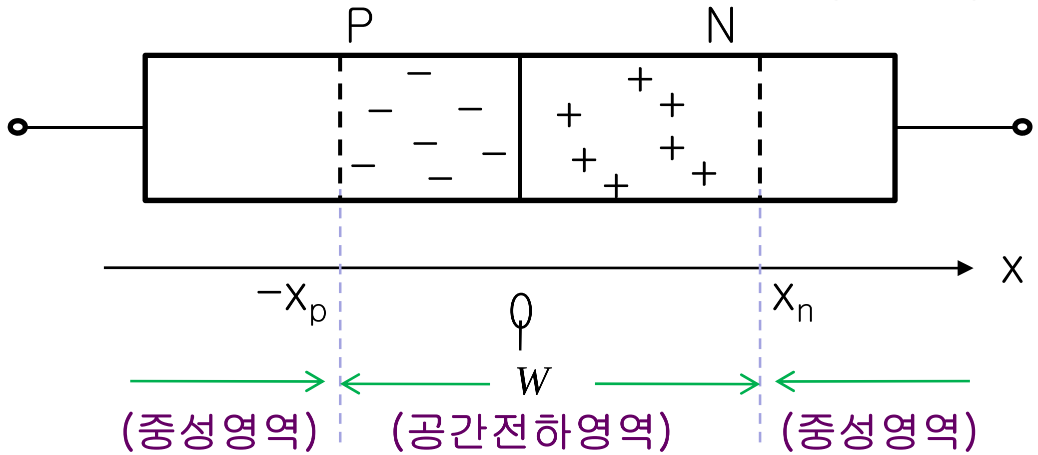
$$x_n = \frac{N_a}{N_a + N_d}W$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2}\frac{e}{\varepsilon_s}\frac{N_a}{N_a + N_d}W^2$$

$$\boxed{\therefore \quad W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e}\left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d}\right)}}$$

: W를 계산할 때 주로 사용

7.2.3 공간전하 폭(空間電荷 幅, space charge region width)



* $x_p + x_n = W$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e}\left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d}\right)}$$

그런데, $x_p N_a = x_n N_d$, $W = x_p + x_n$ 에서 $x_n = \dfrac{N_a}{N_a + N_d} W$ 이므로

$$\therefore \quad x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \frac{N_a}{N_d}\left(\frac{1}{N_a + N_d}\right)}$$

같은 방법으로

$$\therefore \quad x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{e} \frac{N_d}{N_a}\left(\frac{1}{N_a + N_d}\right)}$$

i) W 의 명칭과 의미

① 변천영역(變遷영역, transition region) :

p -> n으로 불순물의 종류가 변하는 영역

② 공간전하영역(空間電荷영역, space charge region) :

보상되지 않은 impurity atom들(N_A^-, N_D^+)이 공간적으로 분포되어 있는 영역

③ 공핍영역(空乏영역, depletion region) :

mobile charge(즉, carrier)인 electron, hole이 없는 영역

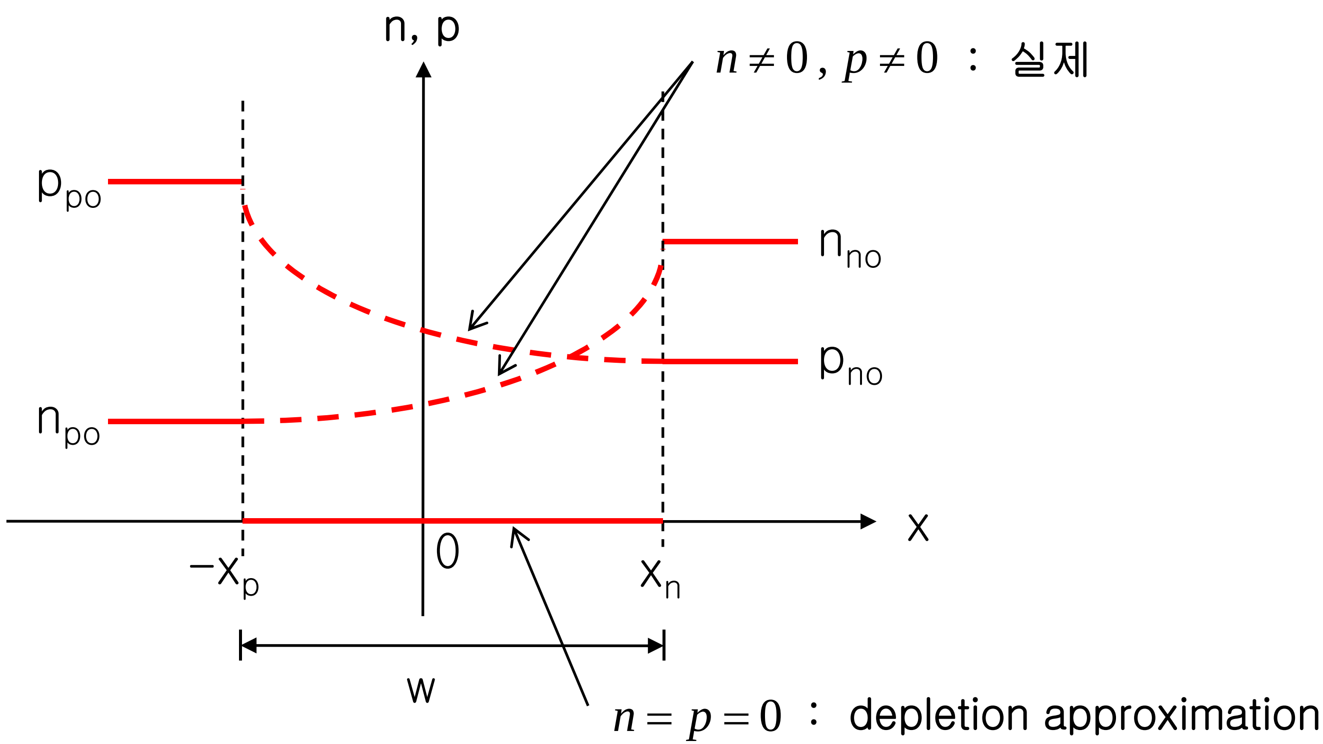
ii) W 이외 영역 : '중성 영역(중성 영역, neutral region)'

공간전하와 carrier가 doping에 의해 주어진 만큼 그대로 존재하고 있어

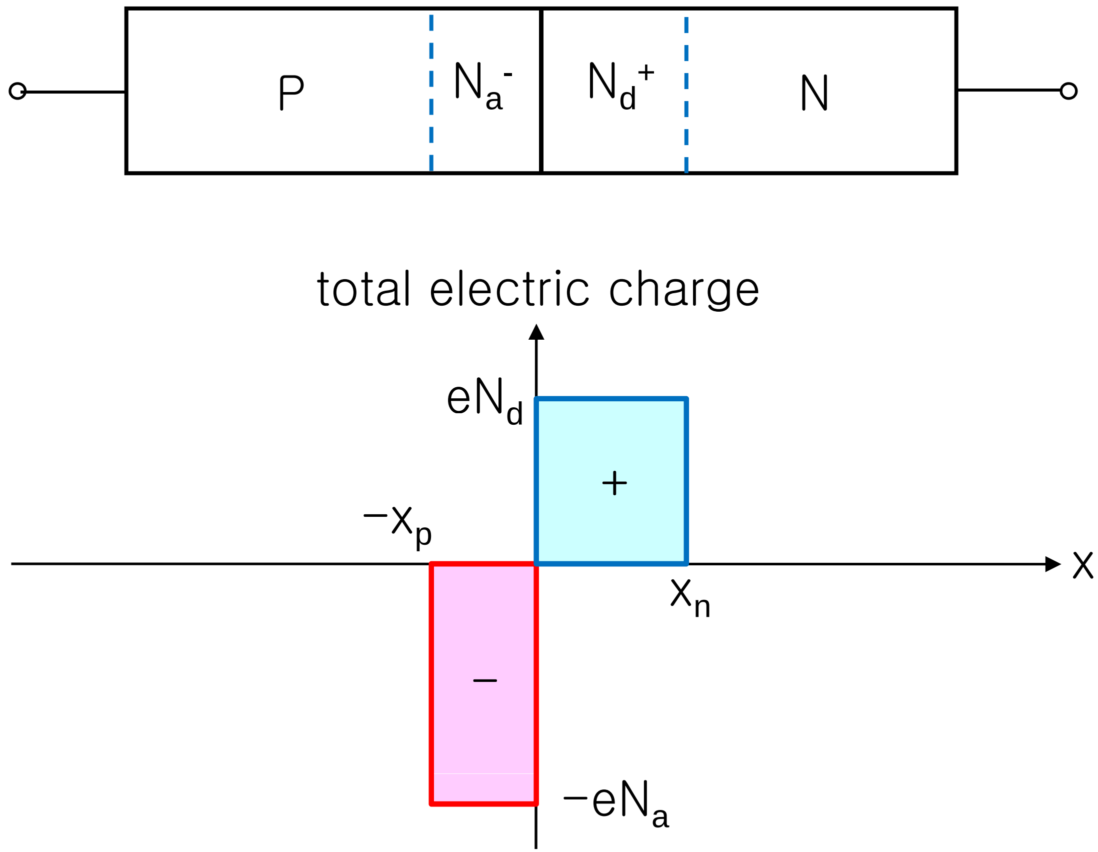
전체적으로 전기적 중성을 유지하고 있는 영역

iii) depletion approximation

- ✓ depletion 영역 내에는 실제로는 아주 적은 양이기는 하지만 carrier들이 존재
- ✓ 그러나 그 양이 N_A^-, N_D^+ 보다 아주 적으므로 무시
- ✓ 즉, depletion region 내에는 mobile charge(carrier)가 하나도 없다고 가정하는 것을 'depletion approximation'이라고 함



iv) 공간전하(space charge)



$$N_a\, x_p = N_d\, x_n$$