

8.4 접합 항복(Junction breakdown)

❖ 항복 현상

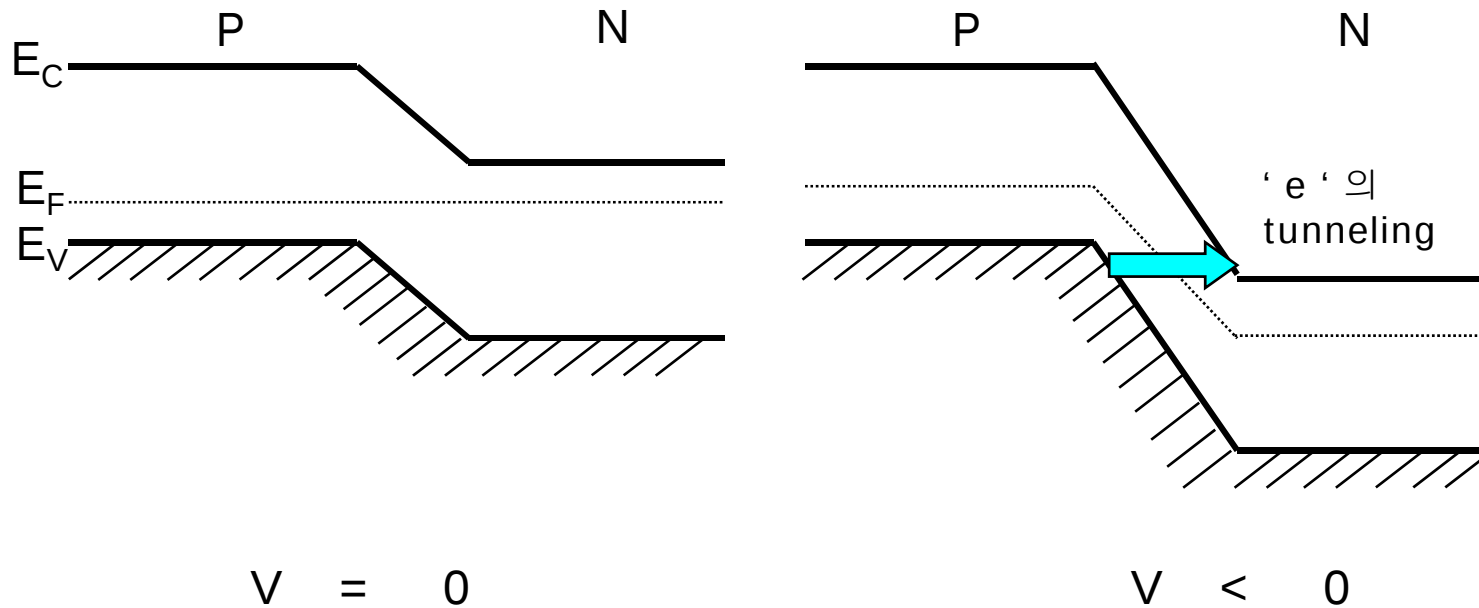
- 역방향 bias된 pn junction에는 아주 작은 reverse saturation current만 흐른다.
- 그러나 역방향 bias의 크기가 어느 정도 이상 커지면 역방향 전류가 급격히 증가하는 현상이 발생한다.
- 이것을 ‘**접합의 역방향 항복**’이라고 한다.

(1) Zener breakdown

❖ Zener effect

- **고농도**로 doping된 pn junction(불순물 분포가 급격히 변함)
- **W가 매우 작고 energy band structure도 급격히 변하므로** 작은 reverse bias에서도 **W 내에 큰 electric field가 걸리게 되어 p-영역의 V.B.에 있는 많은 electron이 n-영역의 C.B.로 'tunneling' 하는 현상**
- 큰 electric field($\sim 10^6$ V/cm order)에 의해 p-영역의 V.B.에 있는 전자가 떨어져 나오므로 ‘**field ionization**’이라고도 한다.

8 장 pn 접합 다이오드(diode)



❖ Zener breakdown

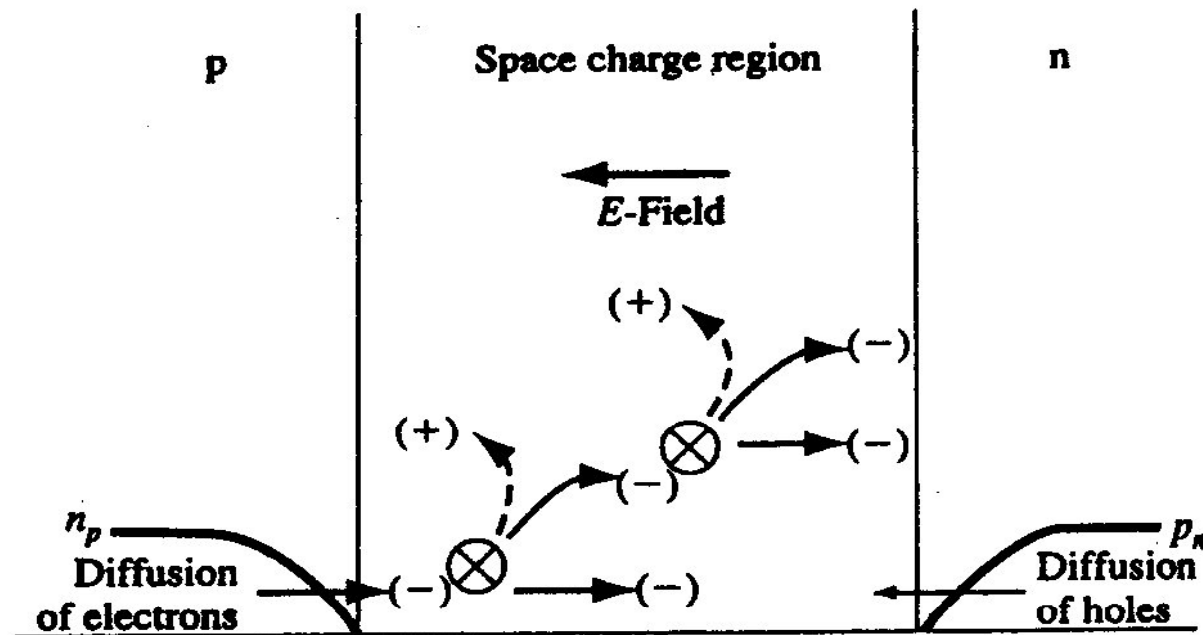
- . reverse bias된 pn junction에서 Zener 효과에 의해 역방향으로 큰 전류가 갑자기 흐르는 현상
- . 비교적 낮은 전압(수 volt)에서 발생
- . 이 현상을 이용한 device 예 : Zener diode, Tunnel diode

8 장 pn 접합 다이오드(diode)

(2) Avalanche Breakdown

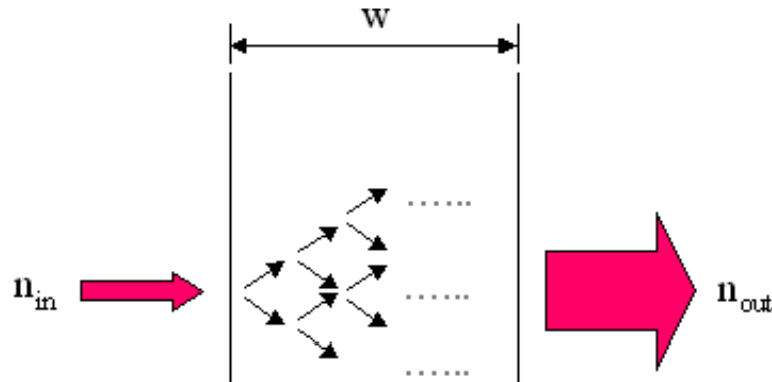
❖ avalanche process

- W를 통과해 지나가는 carrier들이 강한 electric field에 의해 가속되어 그 이동 경로에 있는 atom(Si, impurity)들과 충돌하여 제 2, 3, ... 의 carrier들을 발생시키는 현상



8 장 pn 접합 다이오드(diode)

❖ multiplication factor : M



$$\begin{aligned} n_{out} &= n_{in} + n_{in} \cdot p + n_{in} \cdot p^2 + \dots \\ &= n_{in} (1 + p + p^2 + \dots) = n_{in} \frac{1}{1-p} \end{aligned}$$

여기에서,

n_{in} : 초기 carrier 수

n_{out} : 최종 carrier 수

P : 충돌 확률

$$\therefore M = \frac{n_{out}}{n_{in}} = \frac{1}{1-p}$$

- . doping의 정도에 관계없이 외부 reverse bias가 아주 크게 걸려 carrier들을 강하게 가속시킴으로써 나타나는 현상으로 'impact ionization'이라고도 한다.
- . low doping, high electric field

❖ avalanche breakdown

- . avalanche process에 의해서 carrier multiplication이 발생하여 큰 전류가 급격히 역방향으로 흐르는 현상
- . 높은 전압 (수 volt ~ 수 천 volt)에서 발생
- . 모든 pn junction에서 발생할 수 있음

< pn junction의 I-V 특성에 관한 추가사항 >

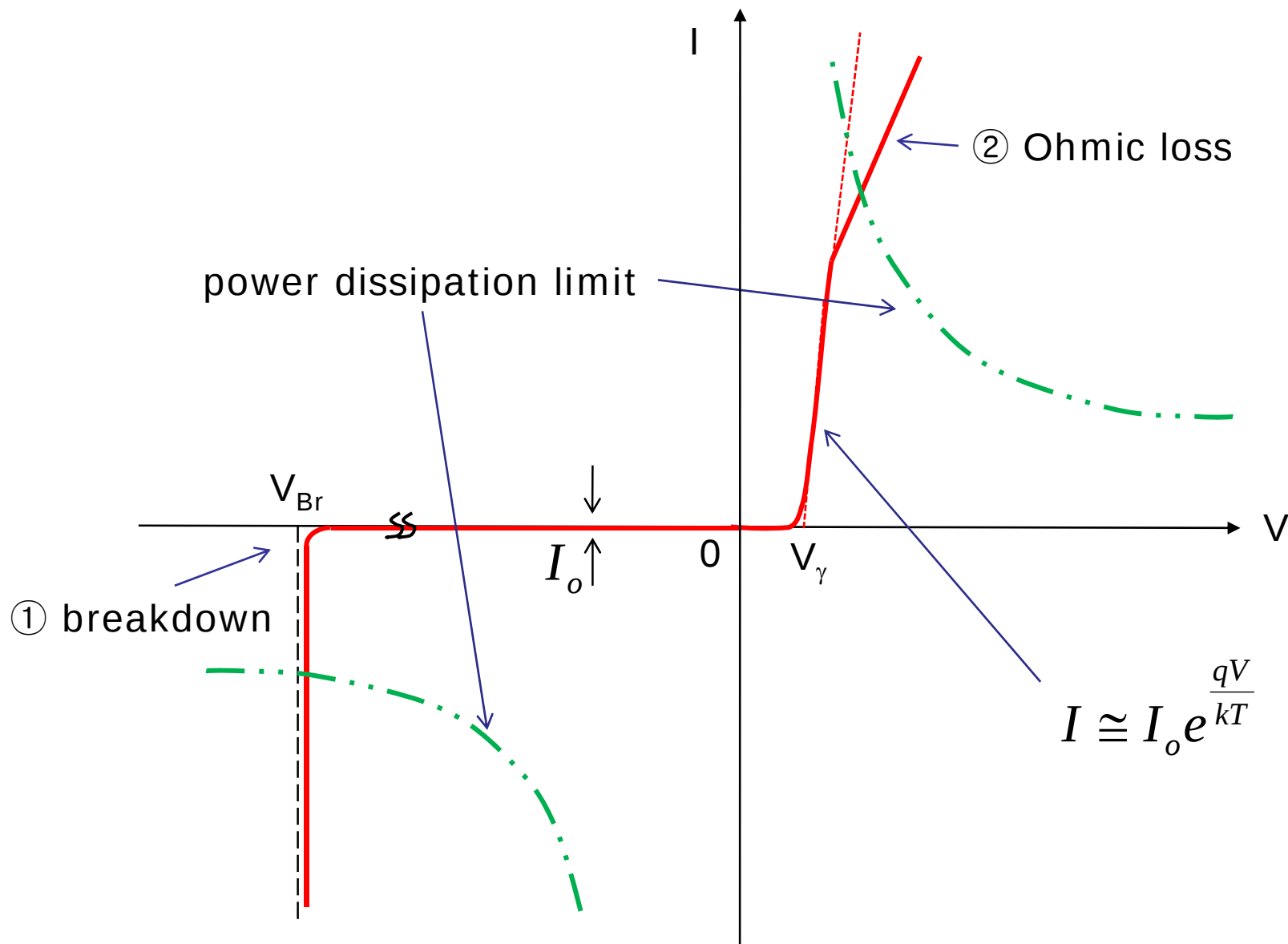
① $V \ll 0$ 일 때 ($V < V_{Br}$)

- ✓ reverse bias가 지나치게 커지면 pn junction의 역방향 차단 특성이 훼손되어 $N \rightarrow P$ 로 큰 전류가 흐름 $\rightarrow$ “reverse bias breakdown(역방향 항복)”
- ✓ pn junction의 I-V 특성은 앞의 ”diode eq.”을 더 이상 따라가지 않게 됨
- ✓ 이 때 흐르는 역방향 전류는 아주 작은 reverse bias의 증가에도 급격히 증가하게 되어 그래프적으로 볼 때 거의 수직적인 변화를 보임
- ✓ breakdown 현상에 의해 흐르는 큰 역방향 전류는 pn junction이 재료적으로 견딜 수 있는 크기까지 증가할 수 있으며, 너무 지나치게 커지면 열이 과다하게 발생되어 pn junction이 타버리게 되고 따라서 pn junction은 영구히 파괴됨
- ✓ 반면에 견딜 수 있는 범위 내에서는 전압의 크기가 줄어들면 (즉, $V_{Br} < V < 0$) 다시 기본적인 I-V 특성을 회복

② $V \gg 0$ 일 때

- ✓ Forward bias가 증가하면 pn junction에 흐르는 전류의 크기가 지나치게 커져서 pn junction의 Ohmic loss(내부 저항 성분으로 인한 에너지 손실)에 의해 과도한 열이 발생하여 타버리게 됨

8 장 pn 접합 다이오드(diode)

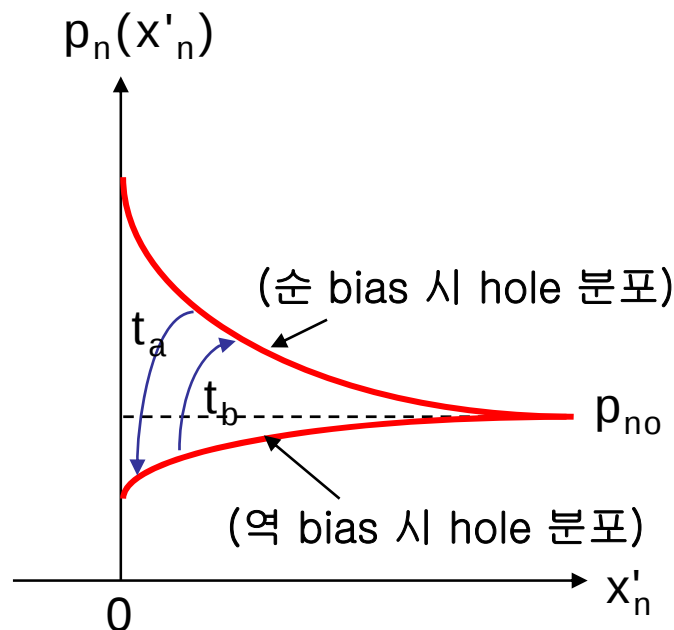


8.5 전하축적(電荷蓄積, charge storage) 및 diode의 과도특성

❖ 축적된 charge의 시간적 변화

- carrier의 injection(또는 extraction)에 의해 carrier가 상대편 영역으로 넘어감.
- bias가 변하게 되면 carrier의 분포 상태도 변함.

❖ n-영역에서 hole의 경우



여기서,

$$t_a, t_b \neq 0$$

(일반적으로 $t_a \gg t_b$)

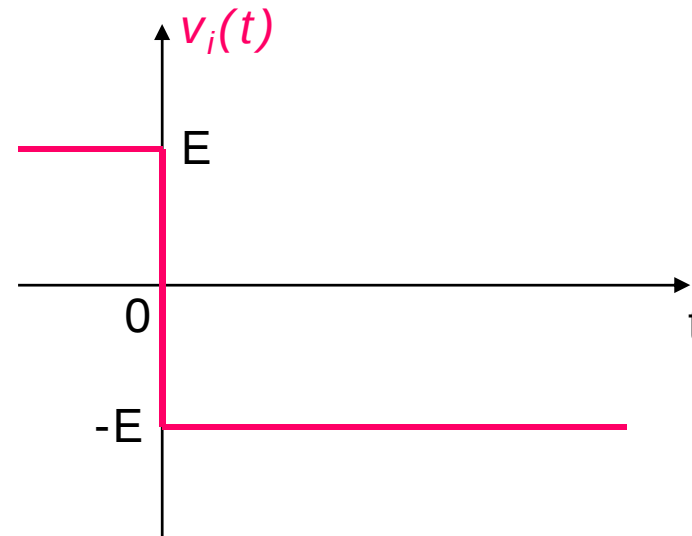
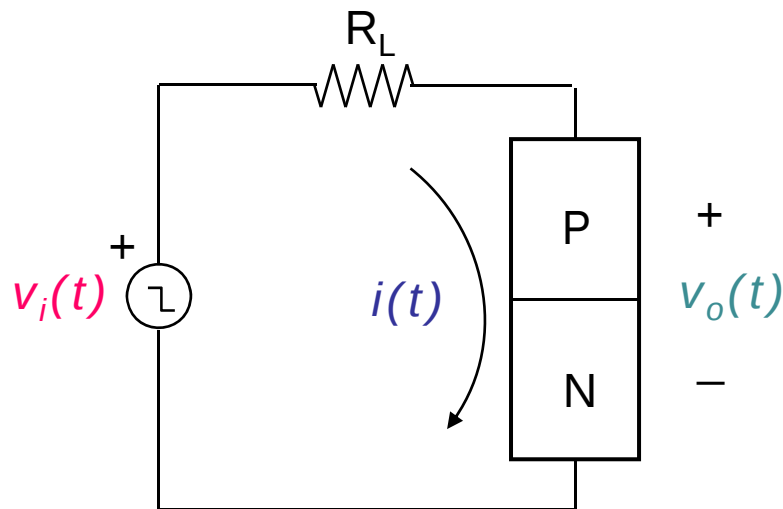
- bias가 급격히 바뀌었을 때, carrier 분포의 재배치가 이루어지는 데에는 시간이 경과.
- 따라서, bias 전압의 변화에 대한 전류의 변화에는 '**time delay**'가 발생.

8.5.1 Turn-Off 과도 특성

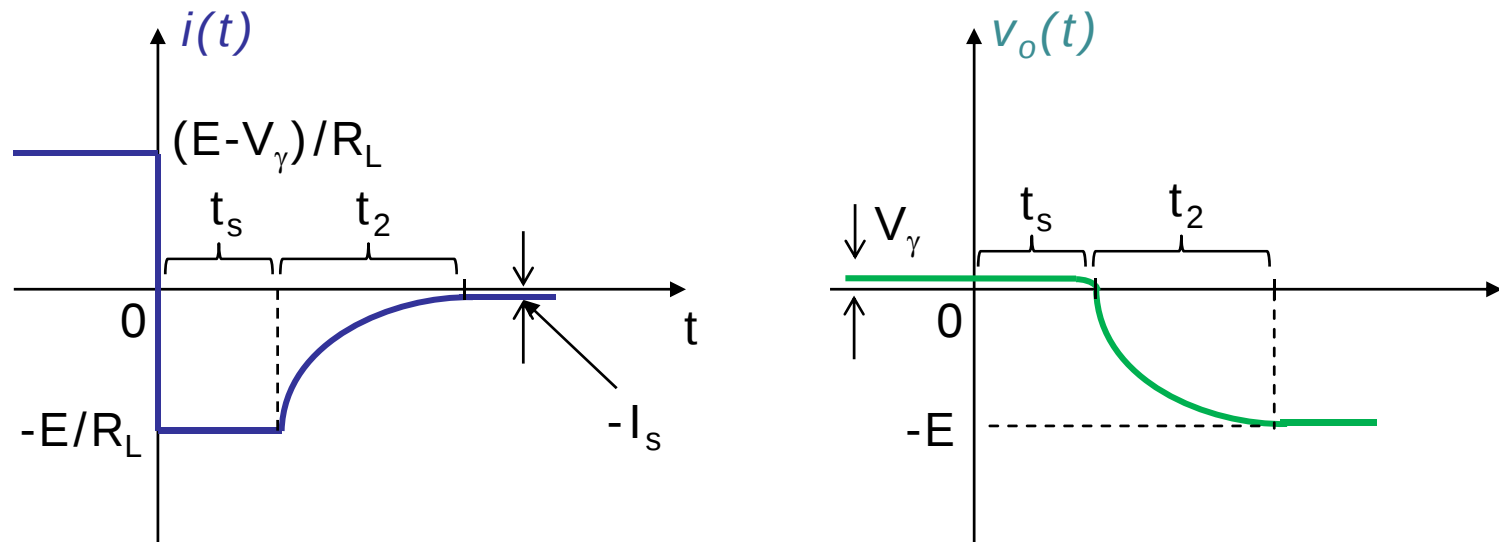
(1) pn junction의 turn-off 과정 : 'reverse recovery transient(역방향 회복 과도현상)'

pn junction의 bias가 forward 상태에서 reverse 상태로 급격히 바뀌어 전류 흐름이 차단되는 과정

(2) Turn-off 과정 해석



8 장 pn 접합 다이오드(diode)



i) $t < 0$ 일 때 : $i(t) = \frac{E - V_\gamma}{R_L}$, $v_o(t) = V_\gamma$ (V_γ : pn junction의 cut-in voltage)

ii) $0 < t < t_s$ 동안 : $i(t) = \frac{-E}{R_L}$, $v_o(t)$: t_s 근처에서 서서히 감소

- . 순 bias 시에 n-영역으로 inject되고 있던 많은 양의 hole들이 bias가 급격히 변하면 다시 p-영역으로 되돌아가게 되므로

"순방향 전류와 같이 많은 전류가 역방향으로 흐를 수 있음"

iii) $t_s < t < t_2$ 동안 : 역방향 전류는 점차 감소,

$v_o(t)$ 는 역 바이어스를 따라가기 위해 반대 방향으로 서서히 증가
(n-영역에 있던 hole의 양이 점차 줄어들기 때문)

iv) $t > t_2$ 이후 : $i(t) = -I_s$, $v_o(t) = -E$

: 역 바이어스 상태로 안정

(3) Turn-off delay time

i) t_s : excess minority carrier가 0으로 감소하는 데 걸리는 시간

→ “**storage delay time(축적 지연 시간)**”

ii) t_2 : diode가 역방향의 정상상태로 도달하는데 걸리는 시간

→ “**transient time(과도 시간)**”

이 때, $t_s + t_2 = t_{rr}$: “**reverse recovery time(역방향 회복시간)**”

✓ t_{rr} : 약 1 msec	~	수 μ sec
(power diode)		(switching diode)

8.5.2 Turn-On 과도 특성

❖ 역 bias 시의 hole 분포에서 순 bias 시의 hole 분포로 되돌아오는데 필요한 시간은,

t_{fr} : “**forward recovery time(순방향 회복시간)**”

(보통, $t_{fr} \ll t_{rr}$ 이므로 무시)

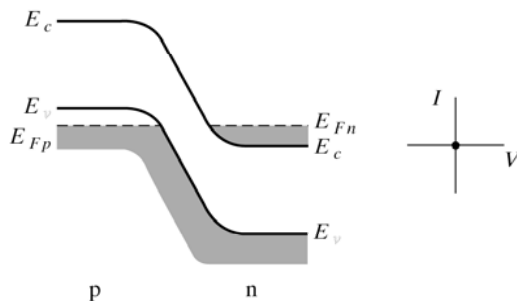
8.6 터널 다이오드(tunnel diode)

❖ tunnel diode

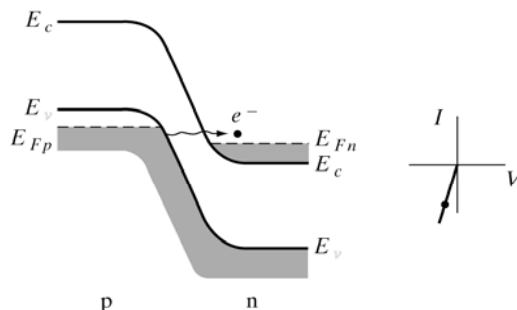
- . n, p-영역 모두 고농도(N_a, N_d 모두 $10^{18}[\text{cm}^{-3}]$ 이상) doping된 pn junction diode
- . Esaki diode라고도 함
- . **negative resistance** 특성을 가지고 있으며 oscillator 회로 등에 사용

❖ tunnel diode의 동작 원리

(1) zero 바이어스



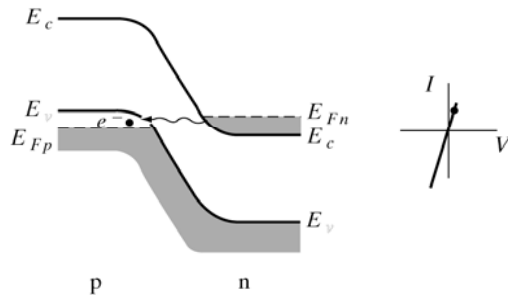
(2) 역 바이어스



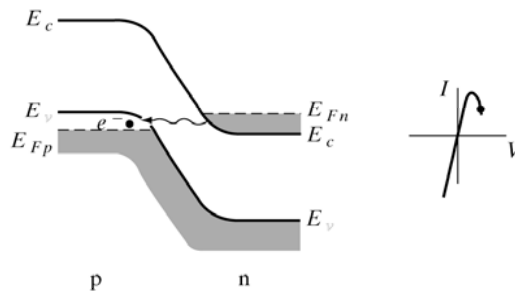
p-type의 V.B. $\rightarrow$ n-type의 C.B.로 tunneling
(tunneling 현상 때문에 역방향으로도 전류가 잘 흐름)

8 장 pn 접합 다이오드(diode)

(3) 순 바이어스



n-type의 C.B. → p-type의 V.B.로 tunneling

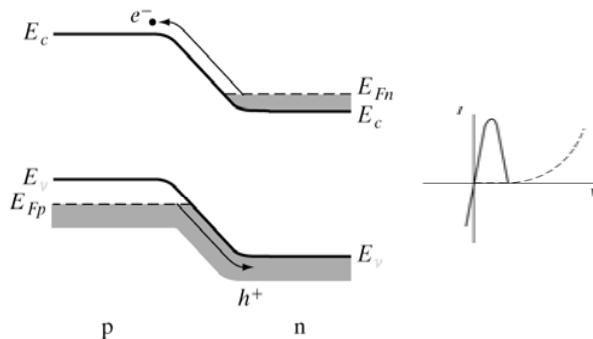


n-type의 C.B. → p-type의 V.B.로 tunneling

이 구간에서 bias(V)가 증가하면 n-type의 E_c 가 E_{Fp} 보다 올라가게 되어 tunneling 현상은 점차 감소. 따라서, dynamic resistance는

$$\Delta R = \frac{dV}{dI} < 0$$

이 되어 negative resistance 특성을 갖는다.



normal operation : 보통 diode와 같은 특성으로 돌아옴

8 장 pn 접합 다이오드(diode)

❖ tunnel diode의 I-V 특성 (종합 결과)

