

# Regione di svuotamento: effetti polarizzazione

- L'applicazione di una tensione modifica il potenziale interno. Assumendo che tutta la tensione risulti applicata alla regione di svuotamento basta sostituire nelle eq. precedenti  $\Psi_0$  con  $(\Psi_0 - V_a)$

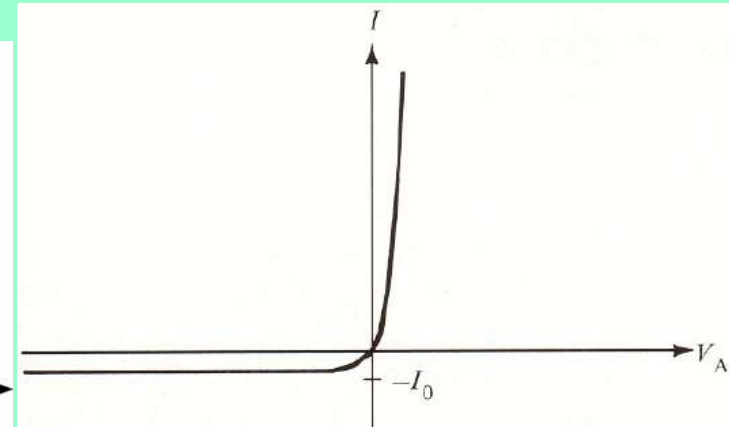
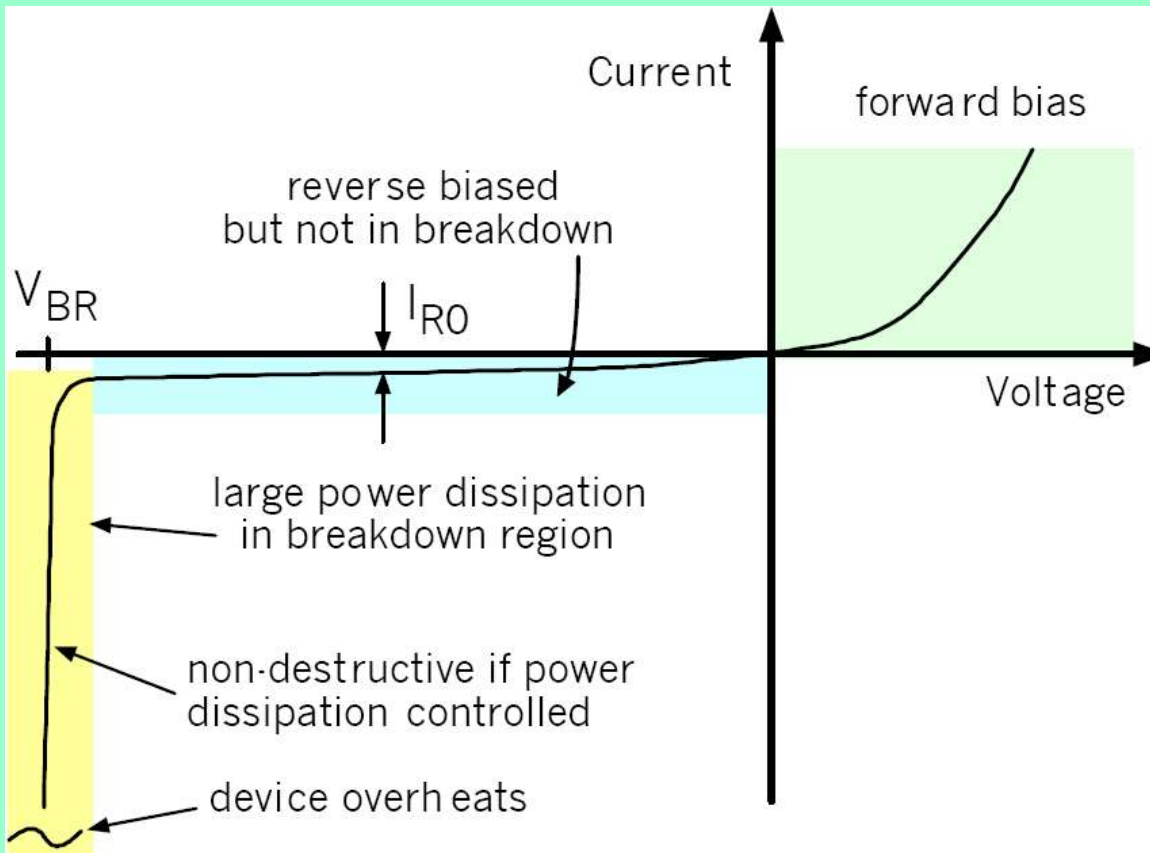
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (\Psi_0 - V_a)}$$

- La polarizzazione diretta **riduce** l'ampiezza della zona di svuotamento, mentre la polarizzazione inversa la **aumenta**.

# Fattori di non idealità del diodo

- Per il diodo ideale si prevede un andamento I-V del tipo

$$I = qA \left[ \frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right] (e^{qV_A/kT} - 1) = I_0 (e^{qV_A/kT} - 1)$$

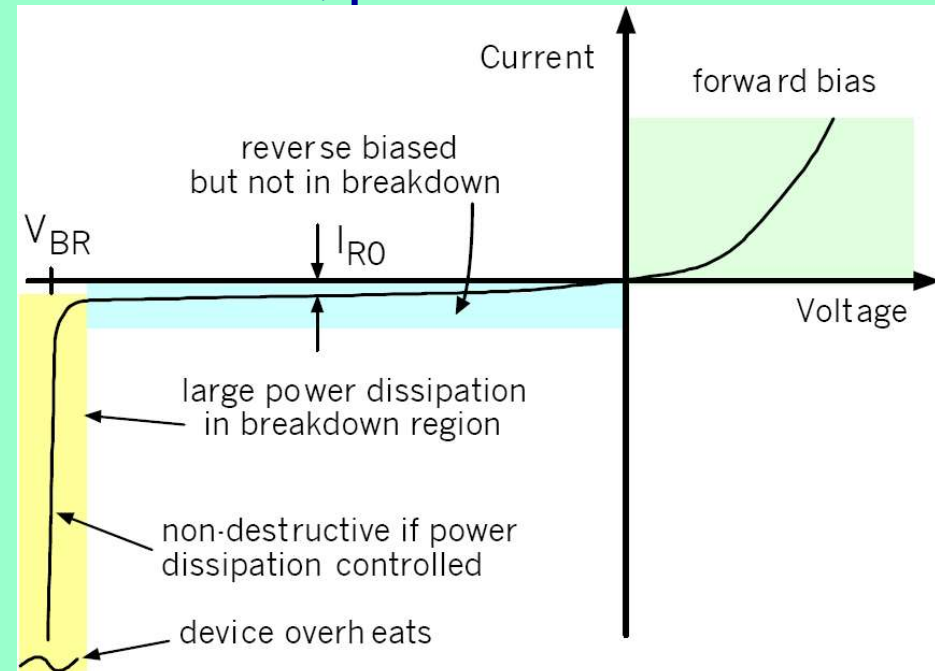
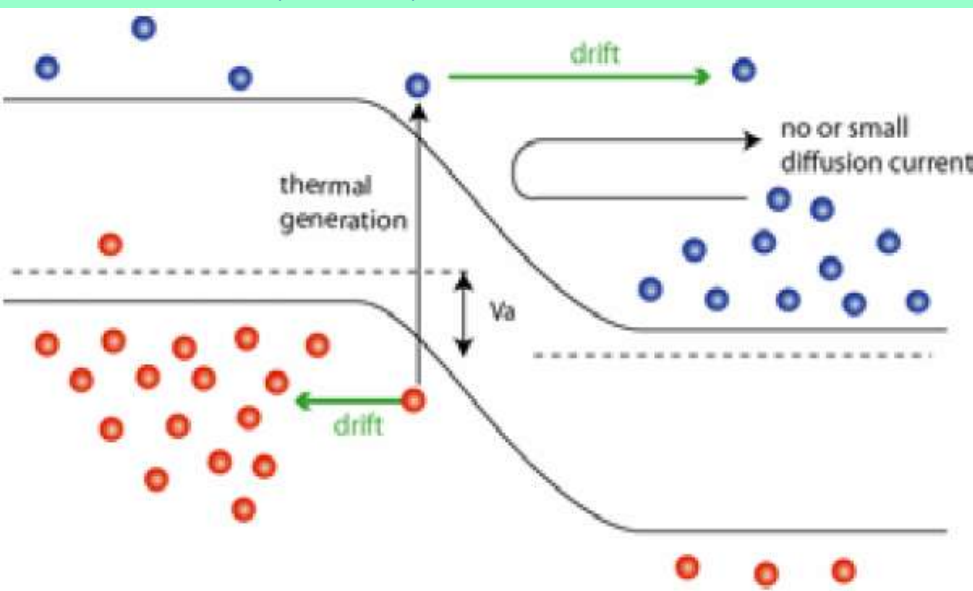


⇐ in realtà

Perché?

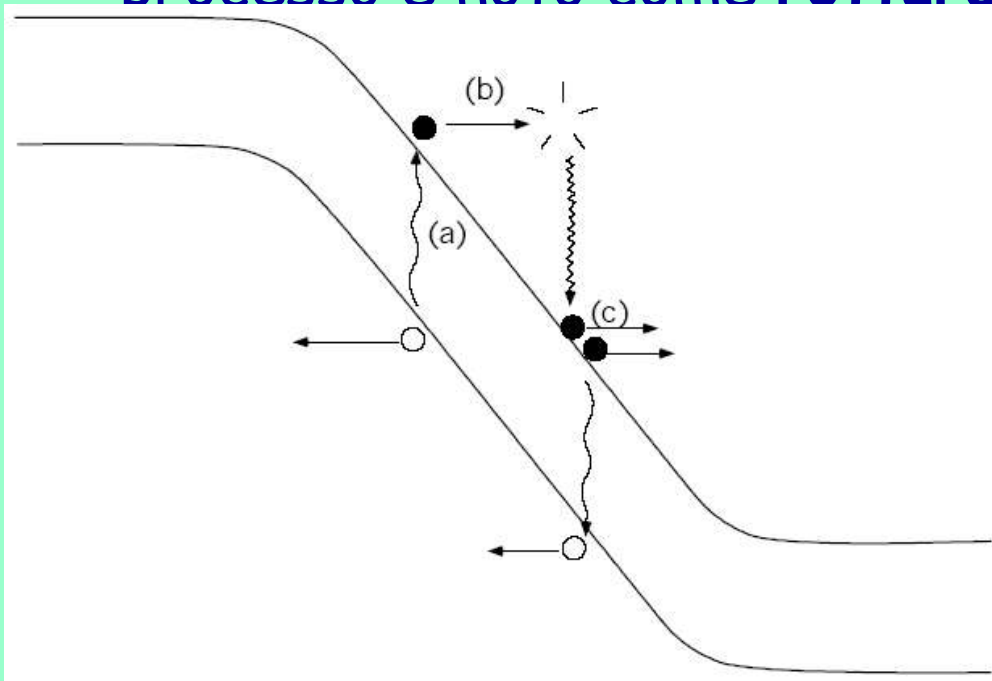
# Fattori di non idealità (pol. inversa)

- La polarizzazione inversa aumenta il campo elettrico alla giunzione e l'ampiezza della regione di svuotamento
- Aumenta la barriera per la corrente di diffusione che, a sua volta, diminuisce
- La corrente di deriva non cambia perché dipende dal numero di portatori e non dalla loro velocità ( $\propto E$ )
- La corrente inversa aumenta leggermente poiché  $W$  cresce e quindi aumenta il numero di portatori generati termicamente e "trascinati" via dal campo elettrico



# Rottura a valanga

- L'incremento del campo elettrico all'interno della zona di svuotamento aumenta la forza con cui i portatori collidono con gli atomi del reticolo
- Per un certo valore critico di energia, le collisioni sono tali ionizzare gli atomi (**ionizzazione da impatto**)
- I portatori ionizzati sono in grado a loro volta di guadagnare energia sufficiente a generarne altri. Questo processo è noto come **rottura (breakdown) a valanga**.



- a) Generazione coppie elettrone-lacuna
- b) Elettrone e buca accelerate, se guadagnano una energia cinetica  $> E_g$  prima di collidere con atomi/reticolo
- c) durante la collisione ionizza un atomo creando una ulteriore coppia elettrone-lacuna

# Rottura a valanga

- La rottura a valanga diminuisce con la temperatura, in quanto è necessario un campo elettrico più elevato per compensare l'incremento di efficienza di scattering con conseguente riduzione del libero cammino medio.

- La corrente di saturazione inversa vale  $I_R = MI_{r0}$

$M$  coefficiente di moltiplicazione

$I_{r0}$  corrente saturazione inversa

$V_A$  polarizzazione inversa

$V_{br}$  tensione minima di rottura

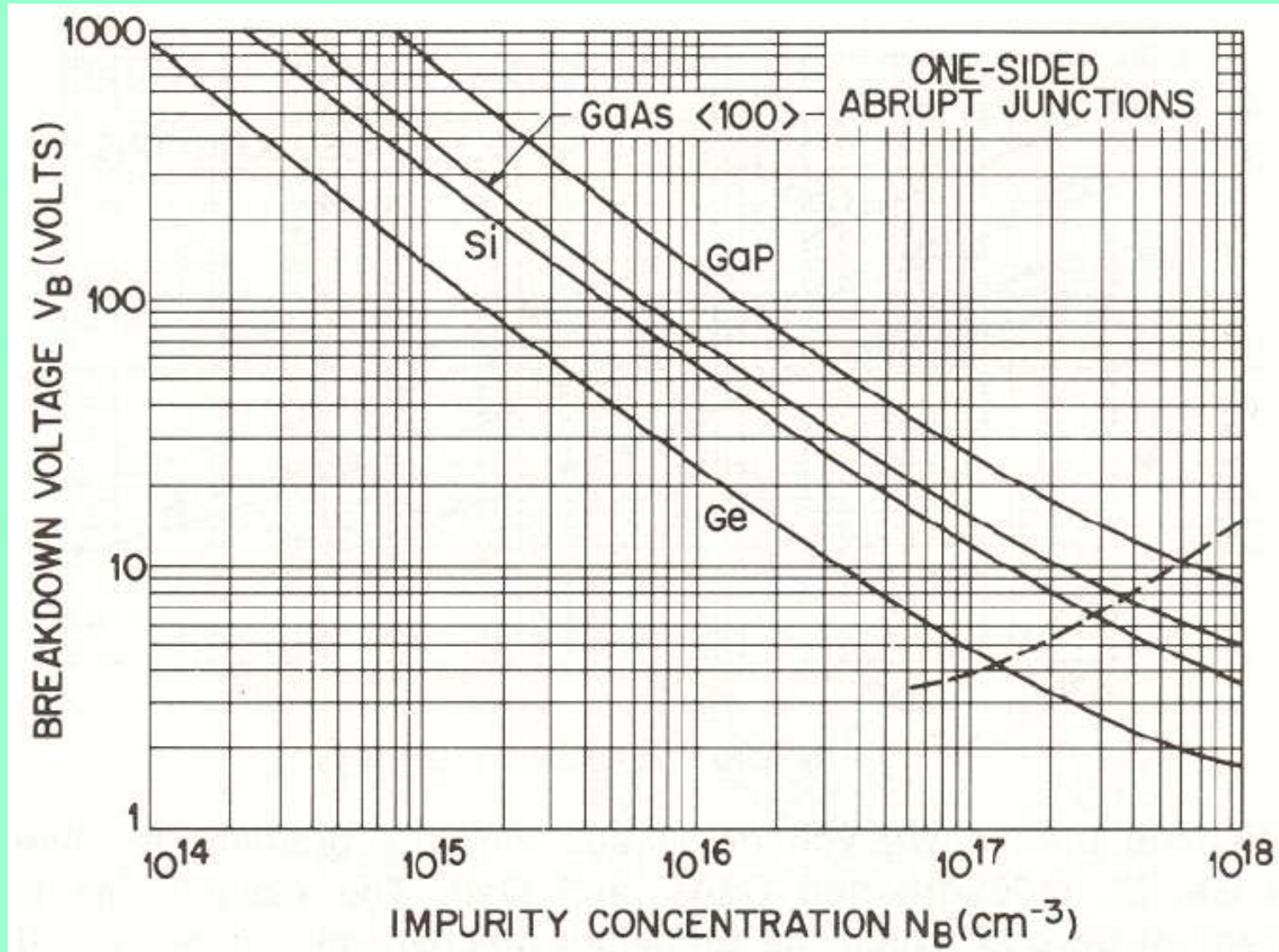
$$\text{con } M = \frac{1}{1 - \left[ \frac{|V_A|}{V_{br}} \right]^m}$$

- Campo elettrico max richiesto per la rottura  $E_{cr}$

$$V_{br} = V_{bi} - \frac{2q}{\epsilon_s N_B} E_{cr}^2 \quad (\text{giunzione asimmetrica brusca})$$

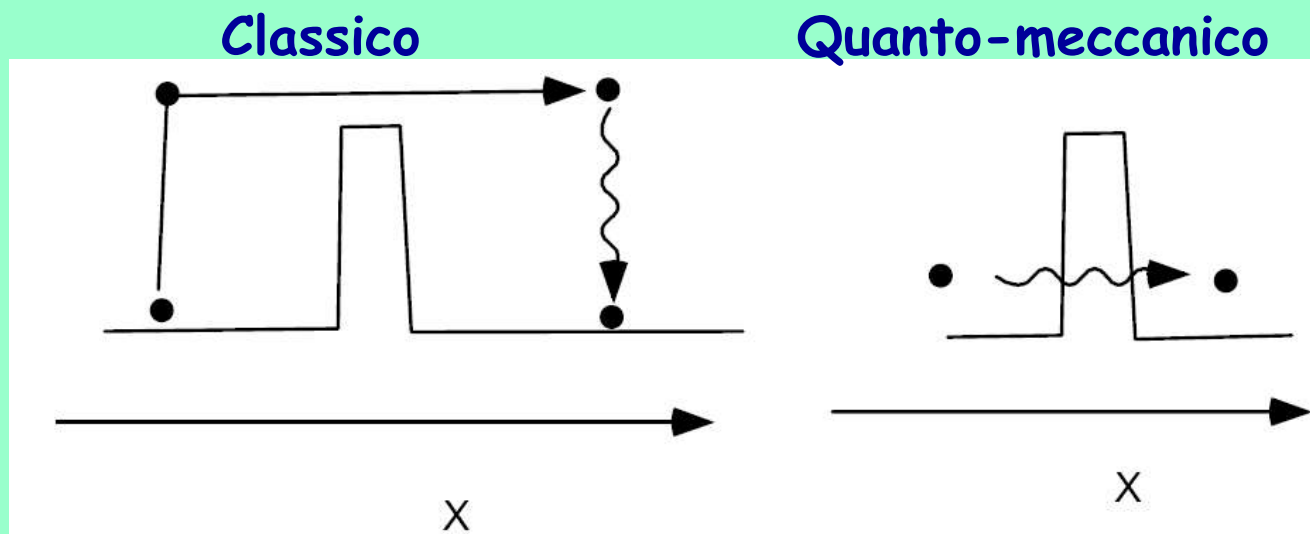
- $V_{br}$  cresce al diminuire di  $N_B$  (zona meno drogata)

# Rottura a valanga



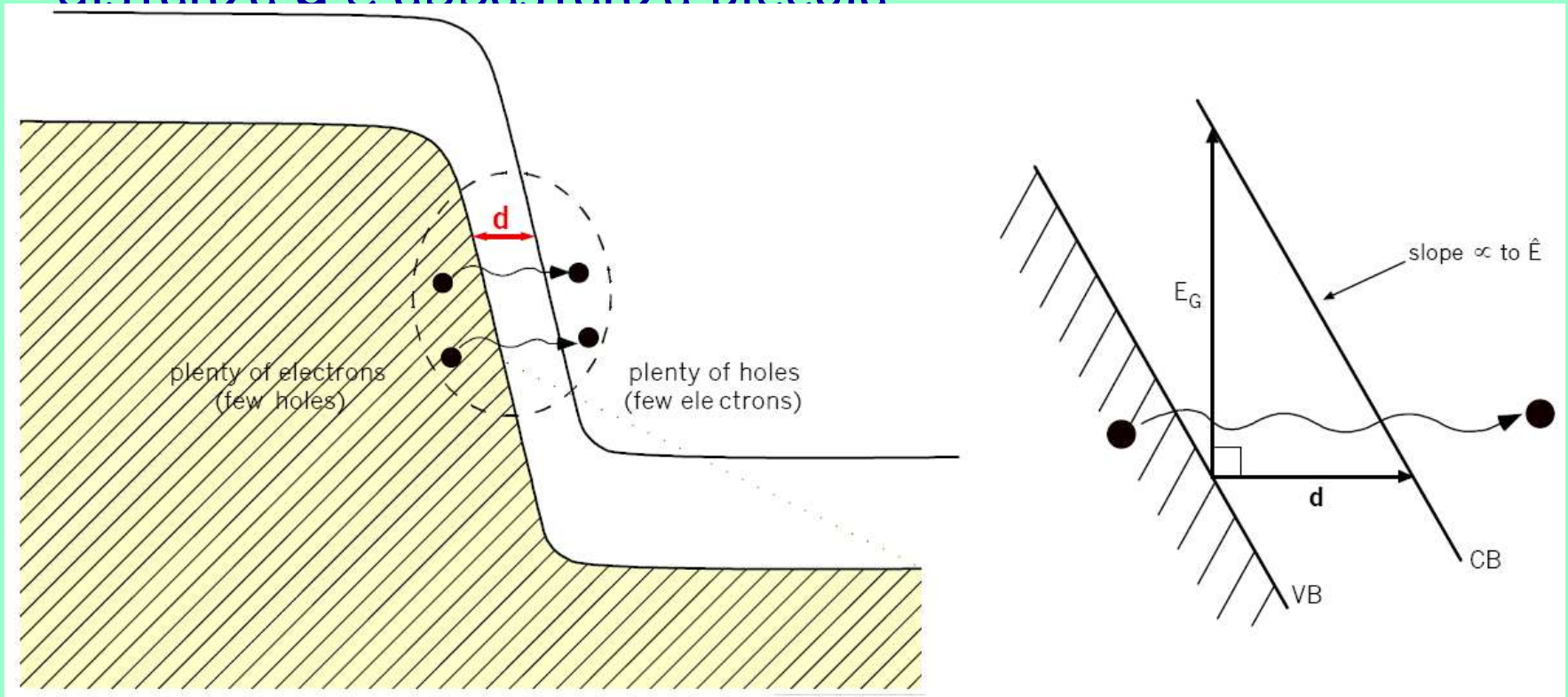
# Rottura Zener

- Le caratteristiche ondulatorie dell'elettrone (effetti quantistici) prevedono che esso possa attraversare regioni "classicamente" proibite: **effetto tunnel**
- La probabilità di tunnelling dipende dal numero di elettroni disponibili, dalla larghezza della barriera e dal numero di stati finali disponibili al di là della barriera
- Il breakdown Zener si manifesta con una corrente di tunnelling che interviene, nelle giunzioni p-n, in presenza di un forte campo elettrico



# Rottura Zener

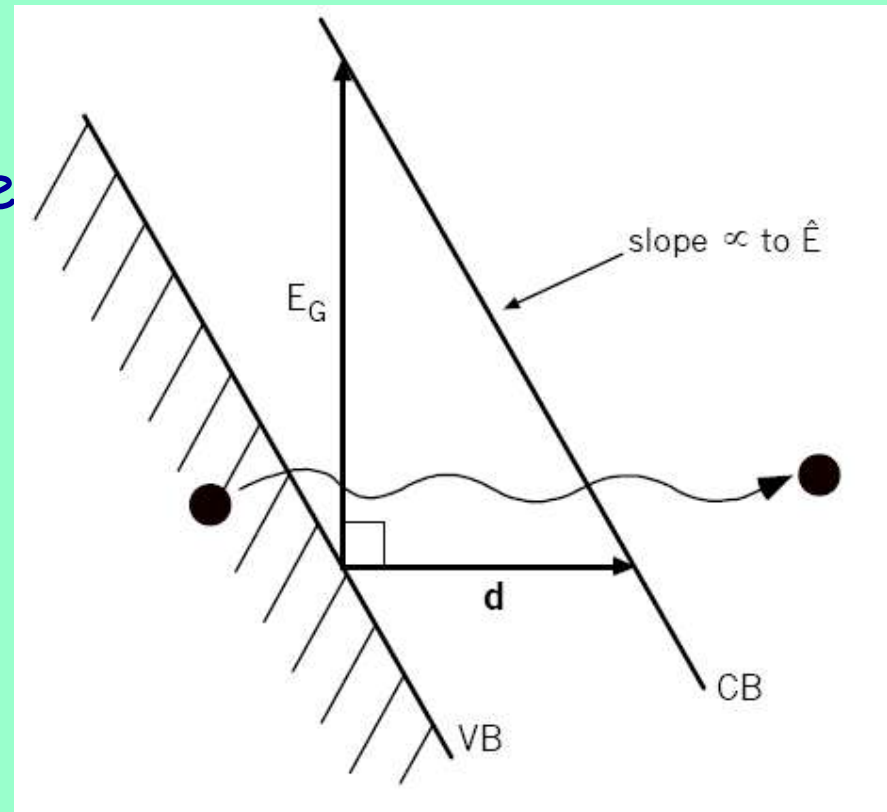
- Normalmente per spostare un elettrone dalla valenza in conduzione è necessaria una energia pari ad  $E_g$
- Tuttavia in una giunzione con forte polarizzazione inversa, nella zona di svuotamento (campo elettrico) un elettrone dalla VB può andare per tunnelling in CB se la distanza  $d$  è abbastanza piccola





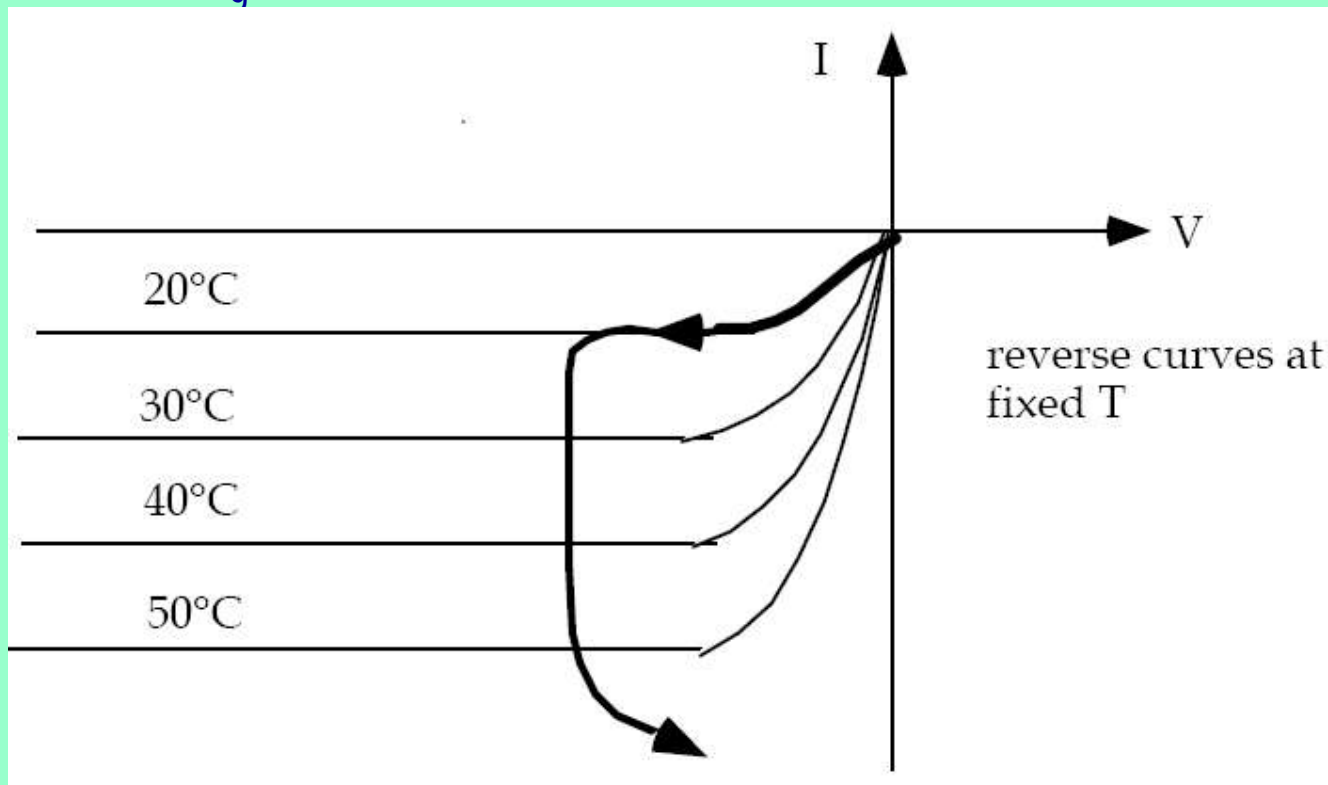
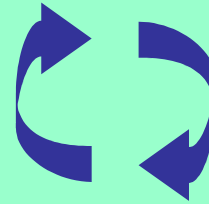
# Rottura Zener

- La distanza minima  $d$  dipende dall'intensità del campo elettrico ("pendenza" delle bande, che a sua volta rende  $d$  più piccola)
- Il campo è dato da  $E_{cr} = \sqrt{\frac{2q}{\epsilon_s} N_B (V_{bi} - V)}$  con  $N_B$  il più piccolo tra  $N_A$  e  $N_D$
- La corrente di tunnelling cresce esponenzialmente al diminuire di  $d$ , pertanto più elevato è il drogaggio minore è la tensione di rottura
- La tensione di breakdown diminuisce all'aumentare della temperatura perché si riduce il gap, così  $d$  è più piccolo



# Rottura Termica

- Al crescere della tensione inversa
  - La dissipazione di potenza aumenta
  - Il diodo si riscalda
  - Aumenta la corrente inversa
  - Cresce la dissipazione di potenza
- Questo effetto è particolarmente rilevante in materiali con piccola  $E_g$  (Ge)

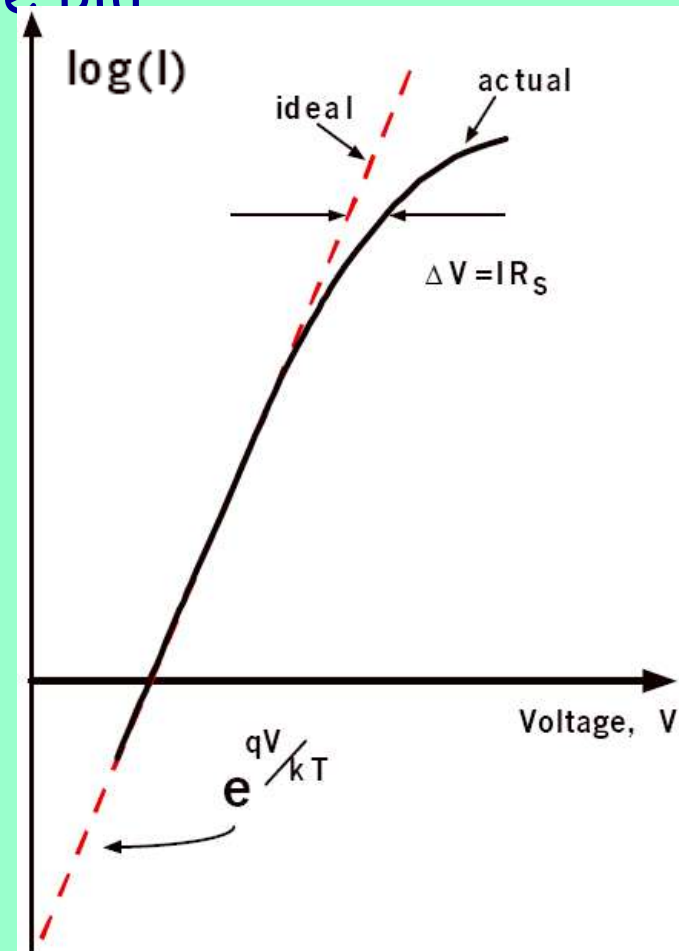
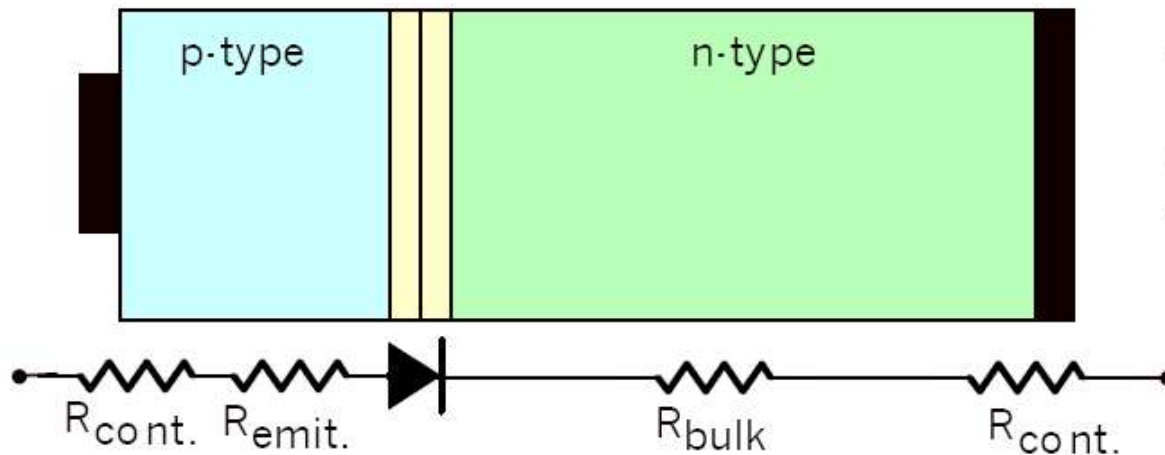


# Caratteristiche I-V: Non-idealità

## Resistenza serie

- La caduta di tensione dovuta al flusso dei maggioritari al di fuori della zona di svuotamento è generalmente trascurabile
- Tuttavia per correnti elevate non lo è più
- Compare una resistenza in serie e l'equazione del diodo diventa:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_S)}{kT}\right) - 1 \right]$$



# Elevati livelli di iniezione

- L'equazione ideale del diodo non prevede elevati livelli di iniezione
- Tale condizione si realizza quando la concentrazione dei minoritari iniettati eguaglia quella dei maggioritari (cioè il livello di drogaggio)
- Dato l'andamento esponenziale dell'iniezione, ciò si può verificare per elevate tensioni in polarizzazione diretta
- La condizione si realizza prima dal lato meno drogato
- In questo caso l'equazione del diodo si modifica:

*dovendo essere* 
$$p_{nb} = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right) = N_D$$

*con*  $p_{nb}$  = concentrazione lacune iniettate nel lato  $n$

*si ricava* 
$$V_{bi} = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

# Elevati livelli di iniezione

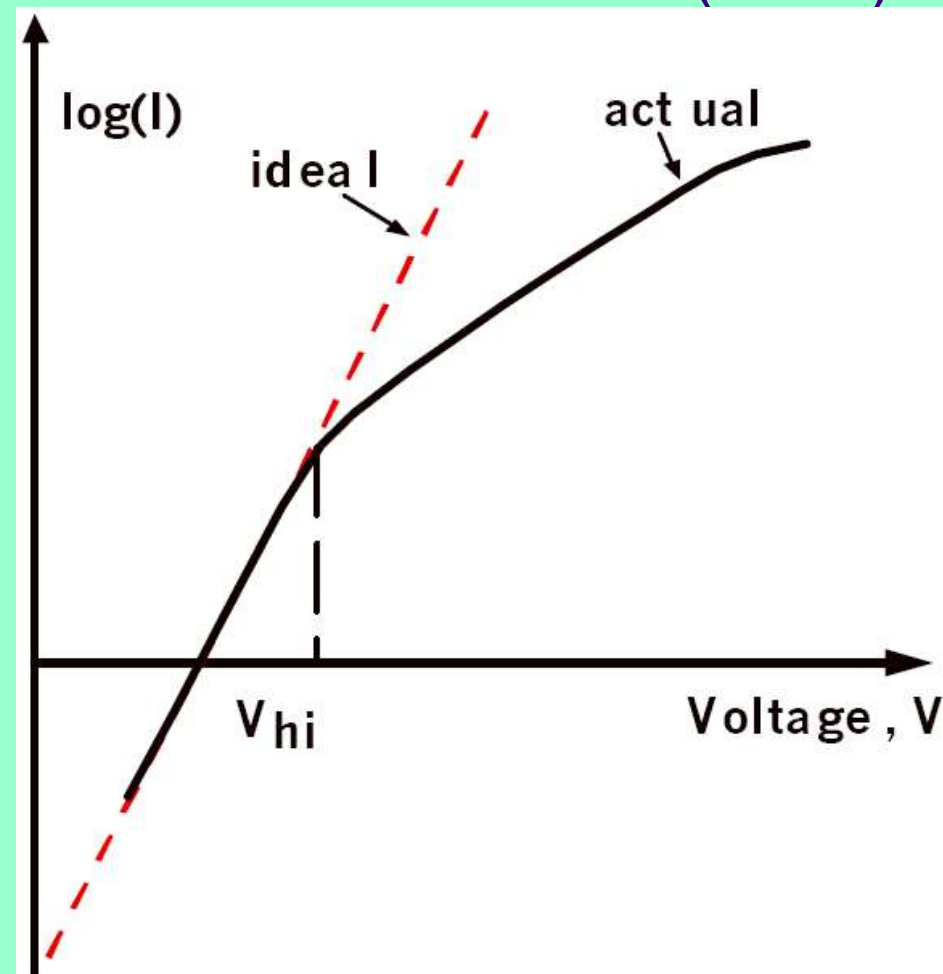
- Elevati livelli di iniezione modificano il flusso di corrente
- I meccanismi di ricombinazione non sono più controllati solo dai minoritari ( $\Delta n/\tau$ ) e la corrente diventa

$$I = I_S \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

- Più in generale l'andamento risulta del tipo

$$I = I_S \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

- Il termine  $n$  rappresenta il fattore di non-idealità, connesso al numero di portatori coinvolto nei processi di ricombinazione
- Per elevati livelli di iniezione quando sono importanti sia i maggioritari che i minoritari esso vale 2



# Ricombinazione nella zona di svuotamento

- Nel caso ideale i contributi della ricombinazione nella zona di svuotamento vengono trascurati, tuttavia per correnti basse sono importanti.
- L'espressione generale per la ricombinazione vale

$$U = \frac{np - n_i^2}{\left( \tau_p n + \tau_n p + \tau_p n_1 + \tau_n p_1 \right)}$$

- Nelle regioni quasi-neutre essendo  $n=N_D$  e  $n_i^2=n_0p_0$ , si ha

$$U = \frac{N_D p - n_i^2}{\left( \tau_p N_D + \text{termini trascurabili} \right)} = \frac{p - p_{n0}}{\tau_p}$$

- Nella regione di svuotamento non vale più  $np=n_i^2$ , piuttosto

$$np = n_i^2 \exp\left( \frac{qV}{kT} \right)$$

# Ricombinazione nella zona di svuotamento

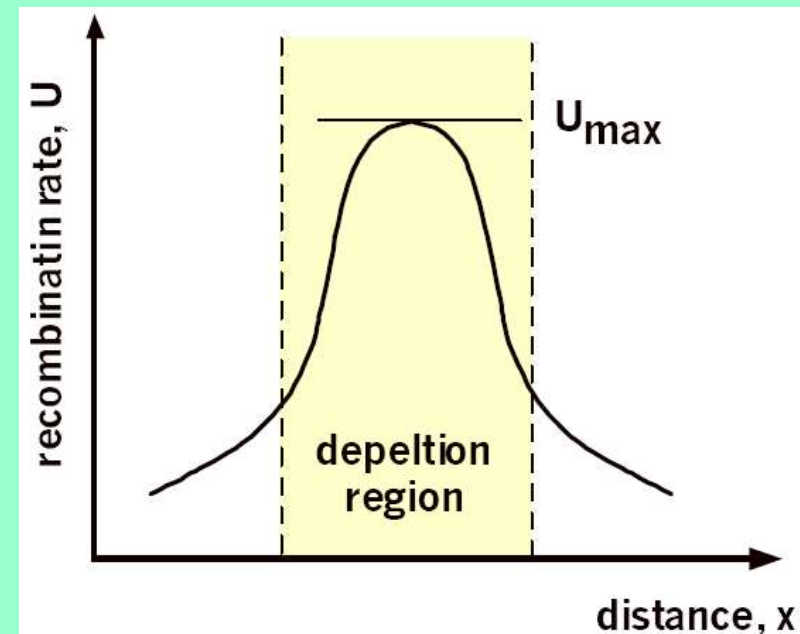
- La velocità di ricombinazione diventa quindi

$$U = \frac{n_i^2 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\left( \tau_p n + \tau_n p + \tau_p n_1 + \tau_n p_1 \right)}$$

- I termini con  $n_1$  e  $p_1$  sono normalmente piccoli e trascurabili
- Nella regione di svuotamento non vale più  $np = n_i^2$ , piuttosto

$$U_{\max} \Rightarrow \frac{d(\tau_p n + \tau_n p)}{dn} = \tau_{p0} - \frac{n_i^2}{n^2} \tau_{n0} \exp\left(\frac{qV}{kt}\right)$$

$$U_{\max} = \frac{n_i^2}{2\sqrt{\tau_p \tau_n}} \exp\left(\frac{qV}{kt}\right)$$



# Ricombinazione nella zona di svuotamento

- La corrente diventa quindi  $I = I_{rec} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$   $I_{rec} \approx \frac{qAn_i^2W}{2\tau_e}$

essendo  $\tau_e = 2\sqrt{\tau_{n0}\tau_{p0}}$  in polarizzazione diretta

$\tau_e = \frac{1}{2}(\tau_{n0} + \tau_{p0})$  in polarizzazione inversa

**Caratteristica I-V  
di un diodo reale  
in pol. diretta**

