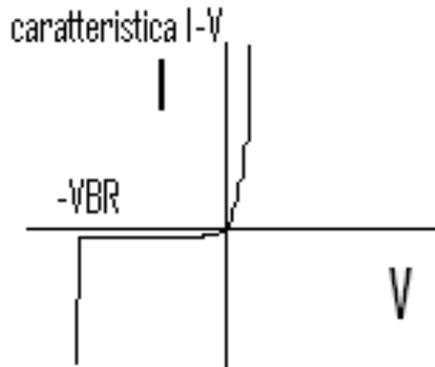


## Zona di Breakdown



Si definisce BREAKDOWN o rottura, il fenomeno per cui in inversa, quando si raggiunge un certo valore di tensione, detto per l'appunto Tensione di Breakdown (e indicato con il simbolo  $V_{BR}$ ), la corrente aumenta in modo brusco raggiungendo valori molto alti (compatibilmente con gli eventuali limiti in corrente dovuti al resto del circuito), mantenendo la tensione ad un valore pressoché costante.

Nonostante il nome, il fenomeno di Breakdown è reversibile e non distruttivo ed è di natura puramente elettrica.

Ciò ovviamente non significa che non possa mai avvenire la rottura fisica di una giunzione. Soprattutto per materiali con piccolo  $E_g$  (es: Ge) la corrente può essere ampia e dar luogo ad un notevole riscaldamento del materiale che a sua volta fa aumentare  $I_r$  fino ad arrivare ad uno stato di totale instabilità termica e al conseguente danneggiamento del materiale costituente la giunzione.

Ci sono fondamentalmente due fenomeni possibili di breakdown elettrico reversibile:

**EFFETTO TUNNEL** (anche detto meccanismo di Zener)

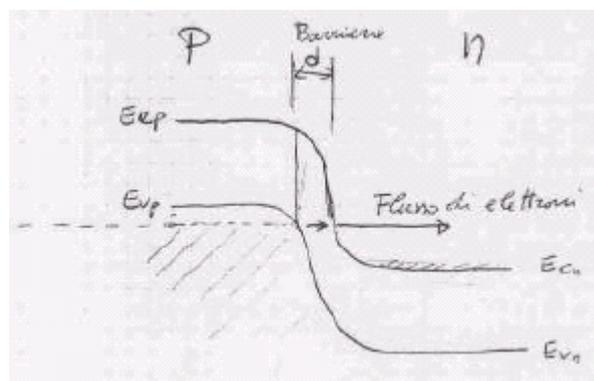
### **BREAKDOWN A VALANGA**

Sono due fenomeni completamente diversi e indipendenti. La prevalenza dell'uno sull'altro dipende dalle caratteristiche della giunzione, in particolare dal drogaggio.

Anche se la fenomenologia del breakdown è identica per entrambi i meccanismi è possibile distinguerli in base all'andamento della tensione di breakdown in funzione della temperatura, senza considerare che l'innalzamento della corrente in corrispondenza della  $V_{\text{breakdown}}$  è generalmente più brusco nel caso della moltiplicazione a valanga.

### EFFETTO TUNNEL (ZENER)

Segno di riconoscimento nel silicio:  $V_{\text{BR}} \leq 4-5 \text{ V}$ .  $\implies$   
 $E'$  originato dalla polarizzazione inversa di una giunzione con  $W$  molto piccolo (alti campi)  $\implies$  alti drogaggi.

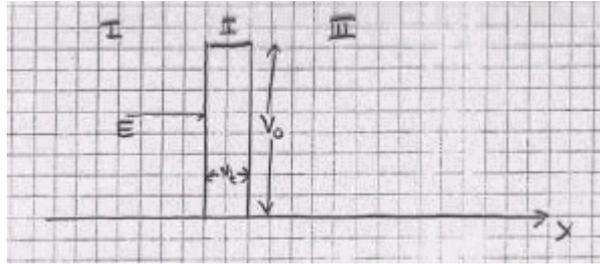


Corrente proporzionale a  $n(E)_{\text{lato p}} \cdot [1-n(E)]_{\text{lato n}}$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{in b.v.}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{in b.c.}}$

Aumentando di poco  $V_{\text{R}}$ , aumenta di molto  $I_{\text{R}}$

## Zener Breakdown



E' basato sull' effetto tunnel.

Esiste una probabilità finita (diversa da zero) che un elettrone passi dalla zona I alla zona III pur avendo un' energia  $E < V_0$ .

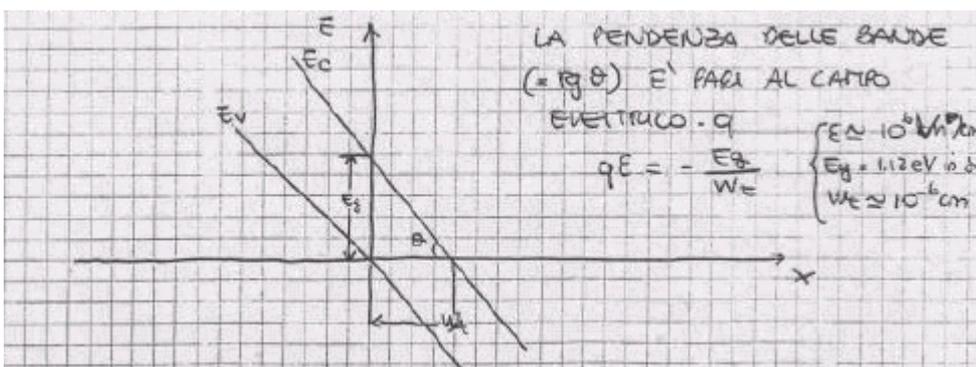
L' applicazione delle leggi della meccanica quantistica mostra che la probabilità di questo fenomeno è significativa solo quando lo spessore  $W_t$  della barriera è piccolo rispetto alla lunghezza d' onda dell' elettrone incidente.

A temperatura ambiente  $\lambda_{e-} \approx 10^{-4}$  cm

il che implica:  $W_t < 10^{-4}$  cm

Affinché questo avvenga i due lati della giunzione dovranno essere molto drogati .

Diagramma a bande nella zona di svuotamento :



La pendenza delle bande (= tg  $\theta$ ) è pari a:

$$qE = E_g / W_t$$

dove:

$$E \approx 10^6 \text{ V/cm}$$

$$E_g = 1,12 \text{ eV in Si}$$

$$W_t \approx 10^{-6} \text{ cm}$$

Per l' elettrone vale la seguente equazione di Schroedinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + [qV(x) - qEx] \psi = E\psi$$

Corrente:

$$I_t = \alpha \frac{EV}{\sqrt{E_g}} \exp\left(-\alpha_1 \frac{E_g^{3/2}}{E}\right)$$

dove E e V sono il campo entro la giunzione e il potenziale ai suoi capi,  $E_g$  è l' "energy gap" e

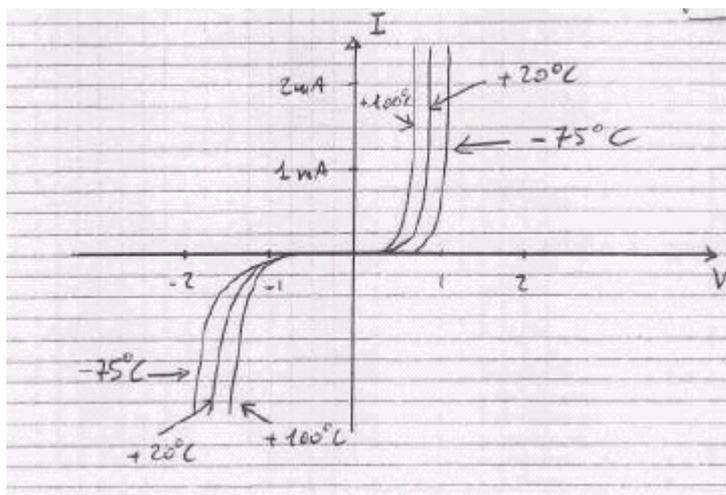
$$\alpha = \frac{\sqrt{2m^*}}{4\pi^2\hbar^2} q^3$$

$$\alpha_1 = \frac{4\sqrt{2m^*}}{3q\hbar}$$

La corrente  $I_t$  aumenta con la temperatura (diminuisce  $E_g$ )

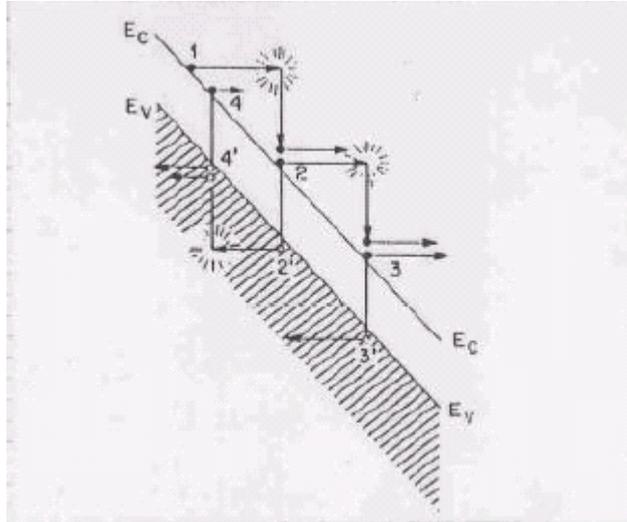
⇒  $V_{BR}$  diminuisce con T

$$\frac{\partial V_{BR}}{\partial T} < 0 \text{ tunneling}$$



## Moltiplicazione a valanga

Si basa sulla ionizzazione per urto (fig 2.26)



ed ha luogo quando l'effetto tunnel non è dominante  
giunzioni non strette  $\longrightarrow$  drogaggi non elevatissimi ( $\leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  in Si).

L'innesco è dato dai portatori generati termicamente entro la regione di svuotamento e in presenza di un campo tanto forte da causare ionizzazione da impatto al termine di ogni cammino libero.

L'effetto valanga fa sì che un portatore generato all'inizio della regione svuotata (si noti che per elettroni e lacune l'inizio è ai capi opposti) termini il suo viaggio alla fine di questa dopo aver generato a sua volta un numero elevato di coppie  $\longrightarrow$

MOLTIPLICAZIONE

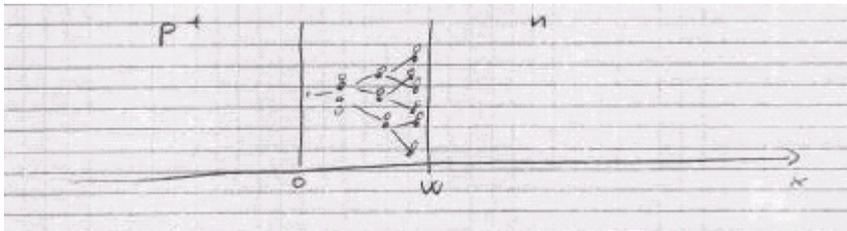
Se il singolo portatore è un elettrone, l'inizio del suo moto dà una corrente  $I_{n0}$ , che, al termine della regione svuotata, si trova moltiplicata:

$$I_n(W) = M_n I_{n0}$$

(dove  $M_n$  rappresenta il fattore di moltiplicazione)

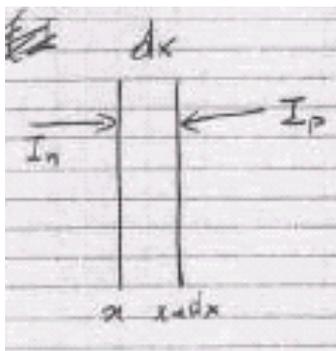
Inoltre, si è creata una corrente di lacune.

A sua volta, correnti analoghe vengono generate da una lacuna "nata" in  $x = W$  (giunzione p+n).



La corrente complessiva  $I = I_n + I_p$ , a regime, è costante.

L'equazione per  $I_n$  in funzione della posizione è:



$$I_n(x+dx) - I_n(x) = I_n(x)\alpha_n dx + I_p(x)\alpha_p dx$$

dove  $\alpha_n$  e  $\alpha_p$  sono le velocità di ionizzazione, funzioni di  $E$ .

Essendo  $I_p(x+dx) \cong I_p(x)$

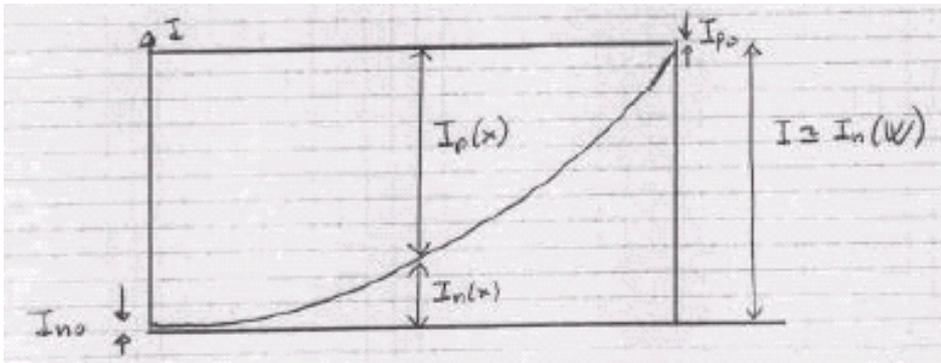
$$dI_n / dx + (\alpha_p - \alpha_n)I_n = \alpha_p I$$

Si assume  $\alpha_n = \alpha_p = \alpha$

$$dI_n/dx = \alpha_p I \quad I = \text{costante}$$

$$\frac{I_n(W) - I_n(0)}{I} = \int_0^W \alpha \, dx$$

Poiché  $I_n(W) = I$  (fig. 3.23)



E poiché, per definizione,  $I_n(0) = I_n(W) / M_n$

$$1 - \frac{1}{M_n} = \int_0^W \alpha \, dx$$

Condizione di breakdown :  $M_n \longrightarrow \infty$ , ossia

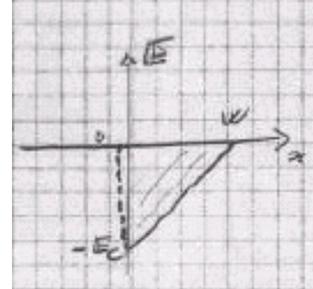
$$\int_0^W \alpha \, dx = 1 \quad (\text{determinazione implicita del campo critico } E_c)$$

$\alpha(E)$  è misurato (fig 2.27)

Dal campo si arriva, per integrazione, al potenziale:

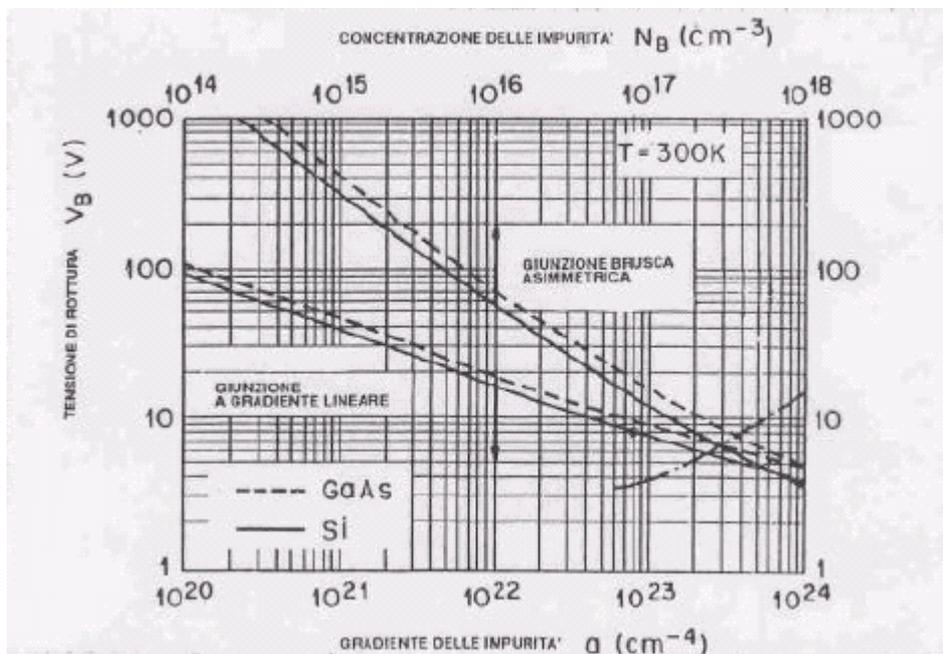
$$V_{BR} = -\int_0^W E dx$$

$$(3.85) \quad V_{BR} = \frac{E_C W}{2} = \frac{\epsilon_s E_C^2}{2q} \frac{1}{N_D}$$

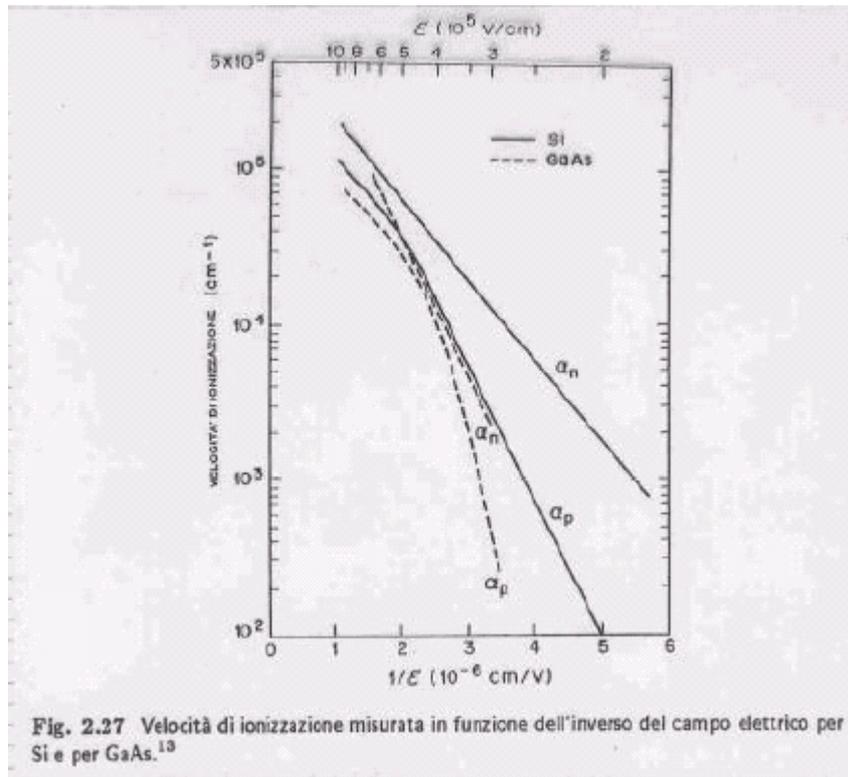


Nel caso di una giunzione brusca asimmetrica.  
Mentre, per una giunzione a gradiente lineare :

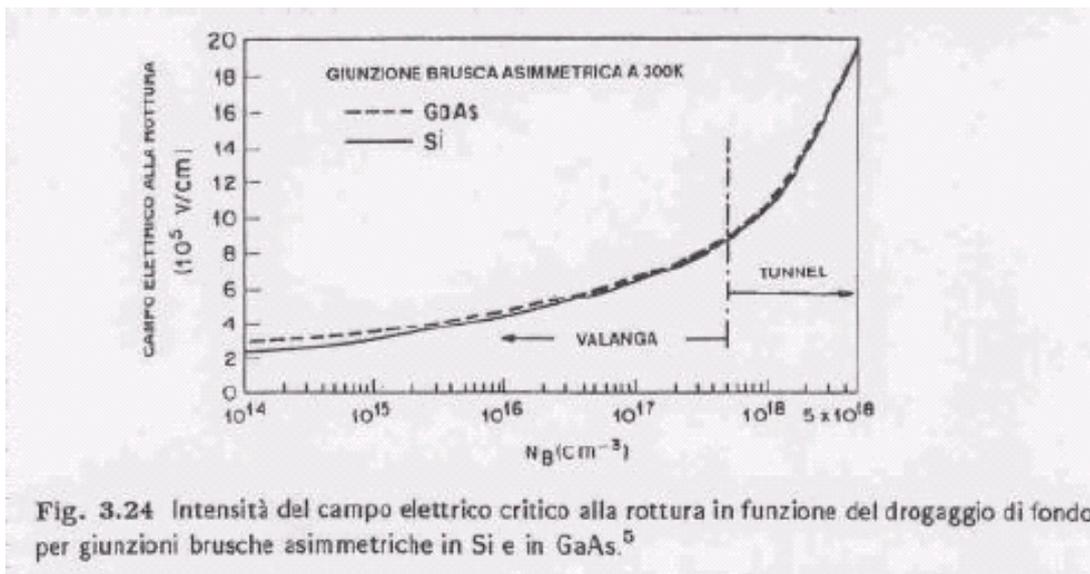
$$(3.86) \quad V_{BR} = \frac{2\epsilon_c W}{3} = \frac{4E_C^{3/2}}{3} \left( \frac{2\epsilon_s}{q} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{a}}$$



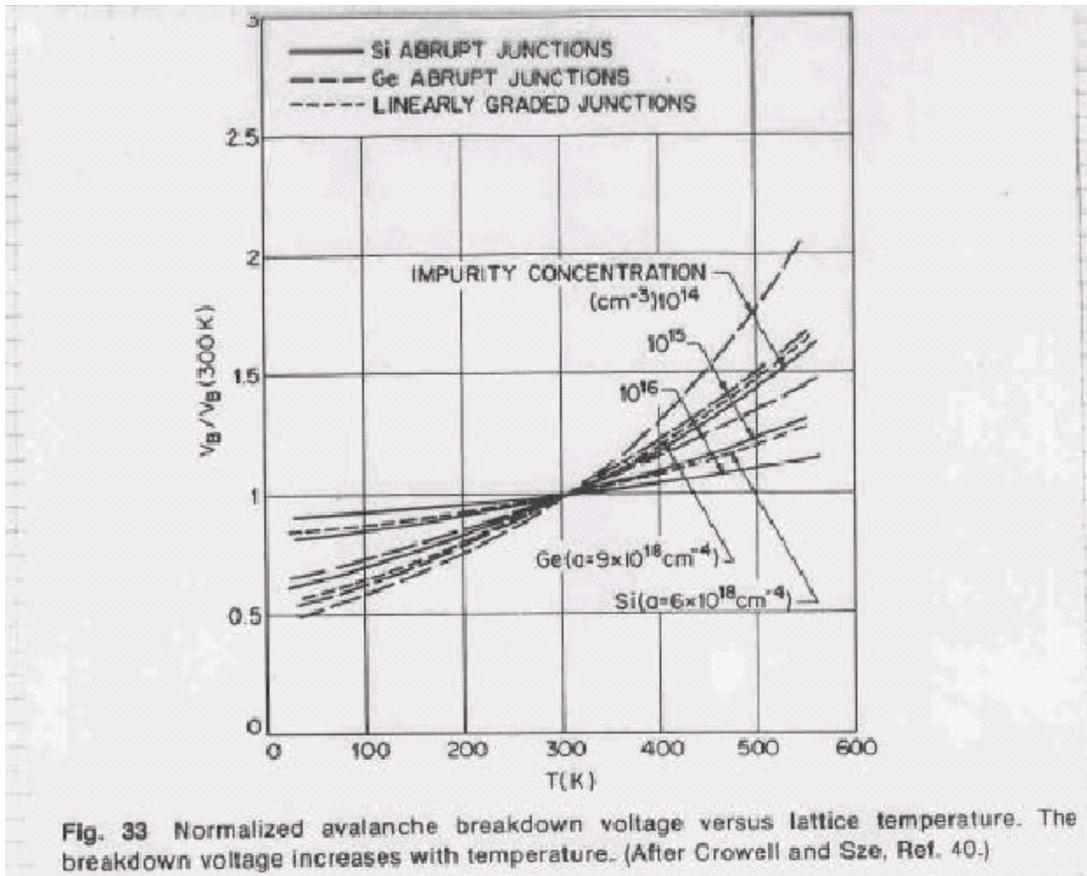
GaAs ha una  $V_{BR}$  maggiore del silicio (maggiore  $E_g$ )



Da questo si ottiene il campo critico  $E_c$  in funzione del drogaggio del lato n (fig. 3.24 con  $N_B=N_D$ ).



## Andamento con la temperatura



All' aumentare della temperatura, la probabilita' di urto con il reticolo aumenta, dunque diminuisce il tempo libero medio tra un urto e l'altro. Pertanto il campo elettrico che accelera i portatori (conferendo loro l'energia necessaria per creare un fenomeno di moltiplicazione durante l'urto) agisce per un tempo inferiore. Percio' per produrre un'energia sufficiente a generare la valanga, occorre che il campo elettrico accelerante sia piu' elevato. Dunque:

$$\frac{\partial V_{BR}}{\partial T} > 0 \quad \text{AVALANCHE}$$

## Effetti di curvatura

