



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1793A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Massara Andrea

MATERIA: Dispositivi elettronici - prof. Piccinini

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

**DISPOSITIVI ELETTRONICI**  
**LEZ. 1**

29.9.2014

- Esame: • scritto: 2 esercizi (uno + teorico, pratico)  
• orale: >= 18

- Libri: • Dispositivi a semiconduttore, S. Sze, Hoepf, BSR TEORIA  
• Esercitazioni sul portale; "Introduzione all'analisi dei dispositivi a semiconduttori". Scaricare PDF da Portale ES

SEMICONDUTTORI:

**MATERIALI IN ELETTRONICA:**

- CONDUTTORI: Al, Cu, Sn, Au
- SEMICONDUTTORI: Si, Ga
- ISOLANTI: SiO<sub>2</sub> (biossido di silicio), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>N<sub>4</sub> → Biossido di zolfo  
→ nitruro di silicio

**IV GRUPPO:** cristallizzano come il diamante

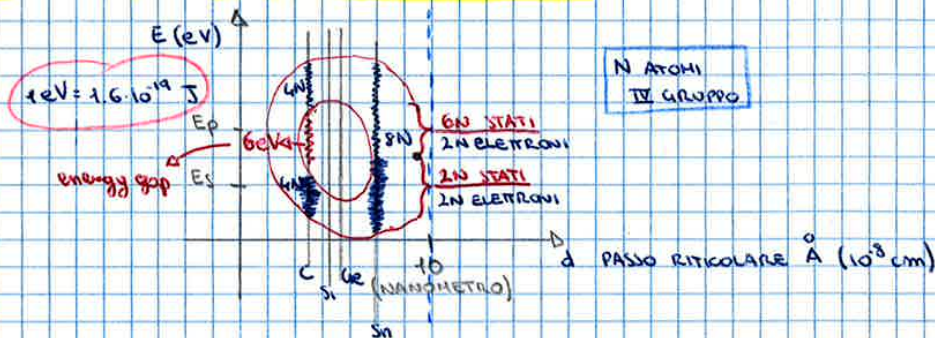
- C<sub>6</sub> 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup>
- Si<sub>14</sub> 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>2</sup>
- Ge<sub>32</sub> 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>10</sup> 4s<sup>2</sup> 4p<sup>2</sup>
- Sn<sub>50</sub> 1s<sup>2</sup> ..... 5s<sup>2</sup> 5p<sup>2</sup>

→ stessa configurazione elettronica che però non basta per fare a meno le stesse proprietà poiché Sn è conduttore, Si e Ge sono semiconduttori

PER DETERMINARE IL COMPORTAMENTO ELETTRICO NON BASTA GUARDARE LA CONF. ELETTRONICA

↓  
SERVE ALTRO ....

**ESPERIMENTO VIRTUALE PER ACQUISIRE INFORMAZIONI:**



- se vado oltre i 10 Å di rivasazione trovo materiali che fanno stessi elettroni del materiale nel sistema isolato
- al di sotto del nanometro le cose cambiano

**DISPOSITIVI ELETTRONICI**  
**LEZ. 2**

30-9-2016

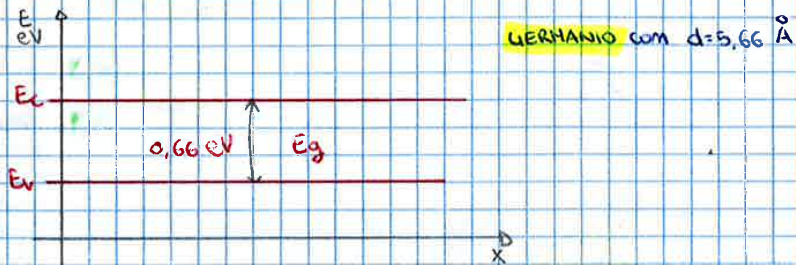
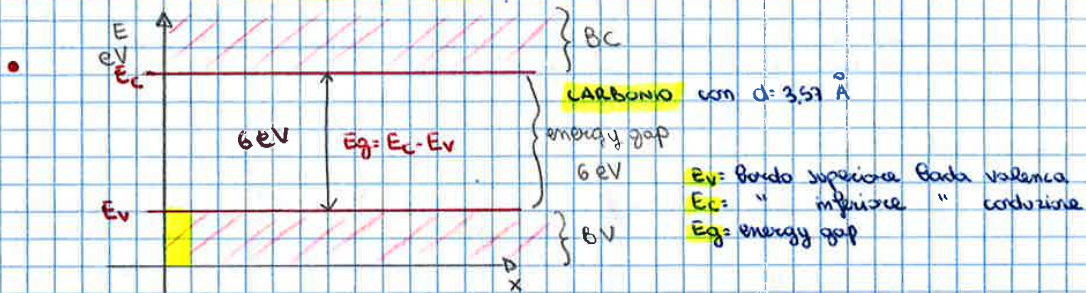
Nei solidi cristallini: \* L'ULTIMA BANDA occupata da e è la Banda di **VALENZA**

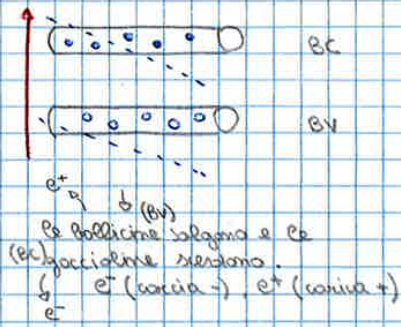
\* LA PRIMA " " " " " " " " **CONDIZIONE**

\* LA **DISTANZA** TRA LE DUE è **energy gap**

**NB** { se energy gap  $> 2\text{eV}$  = ISOLANTE (C con  $6\text{eV}$ )  
 se " "  $< 2\text{eV}$  = SEMI O CONDUTTORE (Si, Ge, Sn con 1,12; 0,66; 0 eV)

**STRUTTURA A BANDE DEI SOLIDI CRISTALLINI**





Applicando una tensione i tubi si inclinano:

- tensione positiva: energia potenziale negativa di  $e^-$

- tensione negativa: energia potenziale positiva di  $e^-$

**DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DI OCCUPAZIONE DEGLI STATI  $f(E)$**

= detta anche funzione di Fermi

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

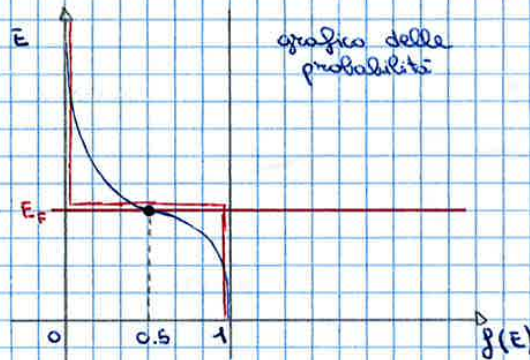
massima energia che un  $e^-$  può avere in un metallo a 0K!

$E_F$ : livello/energia di Fermi

$T$ : temp. in K del cristallo

$kT$ : 26 meV a  $T=300$  K

costante di Boltzmann  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$



a  $T=300$  K  
a  $T \rightarrow 0$  K

NB: al decrescere di  $T$  la curva tende a mettere agli spigoli; se  $T$  aumenta essa si addolcisce

donque ...

$\rho_n(E)$ : DISTRIBUZIONE DENSITÀ DEGLI  $e^-$

$$\rho_n(E) = N_{BC}(E) \cdot f(E)$$

distribuzione = (funzione densità stati) (distribuzione probabilità occupazione  $e^-$ ) =  $N(E) \cdot f(E)$   
densità  $e^-$

**CALCOLO POSIZIONE LIVELLO DI FERMI NEI METALLI ( $E_f$ )**

$$m = \int_{E_c}^{\infty} p_m(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} \gamma_m E^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_f}{kT}}} dE$$

a 0 K:

$$m = \int_0^{E_f} \gamma_m E^{\frac{1}{2}} dE = \frac{2}{3} \gamma_m E_f^{\frac{3}{2}}$$

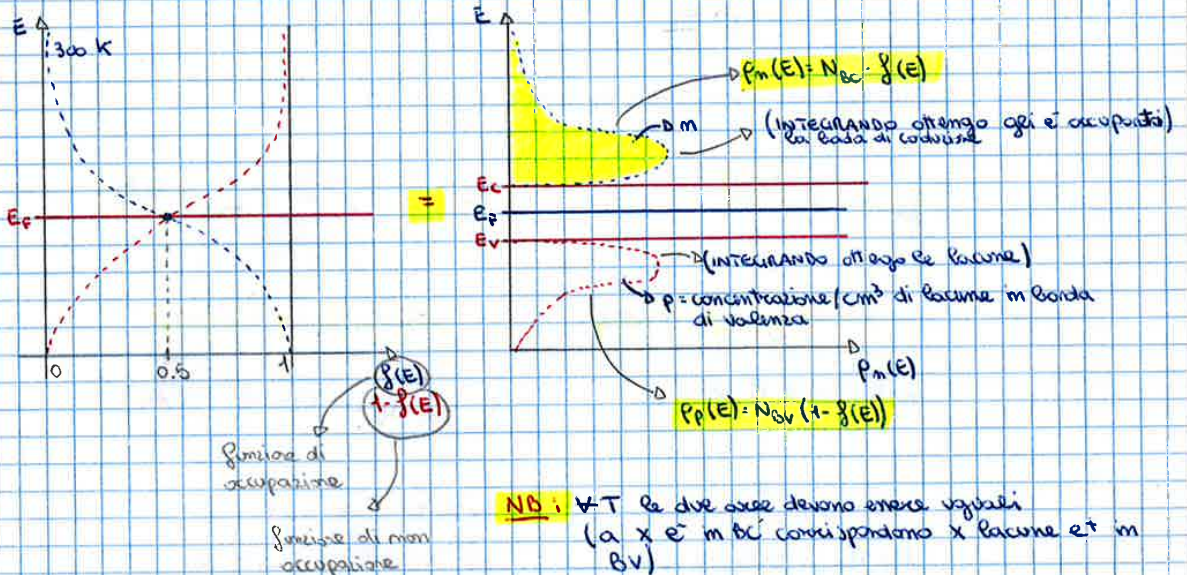
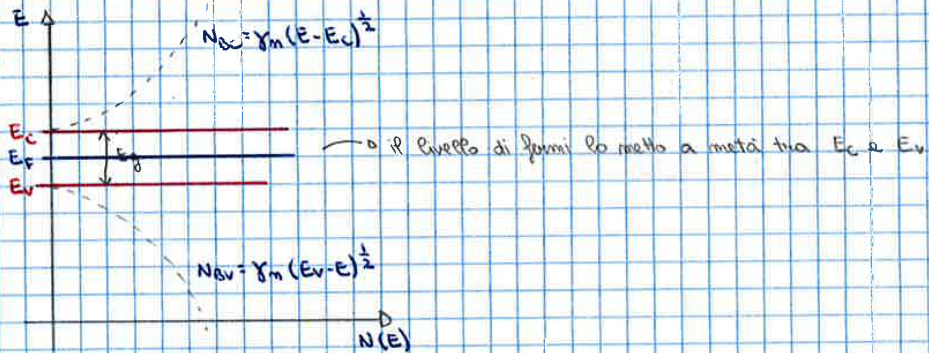
da cui  $E_f = \left( \frac{3}{2} \frac{m}{\gamma_m} \right)^{\frac{2}{3}}$

NB: il calcolo di  $E_f$  è possibile perché è noto  $m$   
 $\frac{4\pi}{h^3} (m_m^* \cdot 2)^{\frac{3}{2}}$

agli estremi di integrazione cambiamo perché a 0 K la distribuzione della prob. di occup. degli stati ( $f(E)$ ) è una funzione a gradino pertanto verticale a zero per energie superiori ad  $E_f$ , tali da rendere nullo il loro contributo

nel grafico  $f(E)$  a 0 K poiché sarebbero tutti i valori di  $f(E)$  minori di  $E_f$  che per  $T=0K$  sono costanti a 1. Gli altri valori per  $f(E) > E_f$  sono eliminati con il cambio di estremi di integrazione

**DENSITÀ DI ELETTRONI E LACUNE NEI SEMICONDUTTORI**



**NB:**  $kT$  le due asse devono essere uguali (a x e in  $BC$  corrispondono x lacune e<sup>-</sup> in  $Bv$ )

**NB:** per questo motivo devo mettere  $E_f$  in perfetta simmetria nell'energy gap

DEVE ESSERE PERFETTA SIMMETRIA E PLACIAMENTO AFINISME SIA GARANTITA L'EQUITA DI E<sup>-</sup> ED E<sup>+</sup>

$$n = \gamma_n \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2(1/kT)^{3/2}}$$

$$p = \gamma_p \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2(1/kT)^{3/2}}$$

$$\gamma_n = \frac{4\pi}{h^3} (2m_n^*)^{3/2}$$

$$\gamma_p = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{3/2}$$

$$n = \frac{2\pi(2m_n^* kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$$

$$p = \frac{2\pi(2m_p^* kT)^{3/2}}{h^3} \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$$

$N_c$  = densità efficace degli stati in BC

$N_v$  = densità efficace degli stati in BV

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$$

$$p = N_v \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$$

è ciò che resta di  $f(E)$ .  
 È chiamata efficace poiché  
 in  $N_c$  e  $N_v$  sono compresi  
 tutti  $e^-$  e  $e^+$  che danno  
 contributo

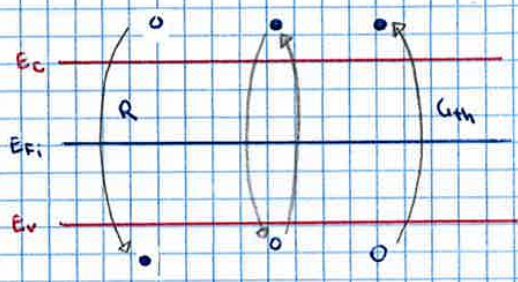
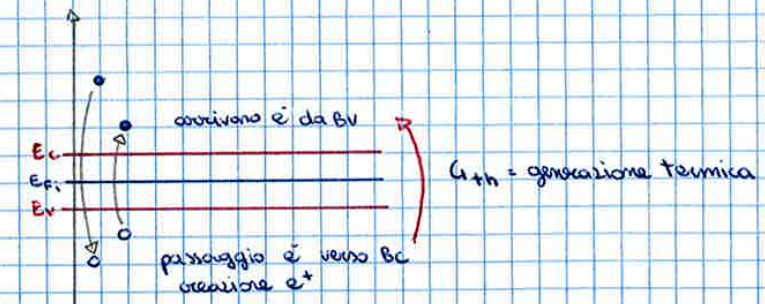
↓

Usa le 2 eq per valutare  $E_f$

**NB:** Semiconduttori "PURI" o "NON DOPATI" son detti **INTRINSECI**. Usa  $E_a$  i come pedice

- $n \rightarrow n_i$
- $p \rightarrow p_i$
- $E_f \rightarrow E_{fi}$

**SEMICONDUTTORI PURI / INTRINSECI**



**RICOMBINAZIONE = GENERAZIONE TERMICA**  
 $kT$  deve essere equilibrio

$$R = G_{th}$$

↓

$n_i, p_i$  costanti

$\Rightarrow n_i(T) = p_i(T) = \text{CONSTANTE}$

**NB** questo non implica che siamo zero. Bice costante xk il tempo impiegato è piccolissimo

DISPOSITIVI ELETTRONICI  
LEZ. 5

7-10-2014

DIAGRAMMA A BANDE DI UN SEMICONDUCTORE



**[NB]** Il lavoro di estrazione nei semiconduttori perde il significato fisico che ha nei metalli seppur mantenendo il concetto teorico dei metalli

$q\chi = \text{AFFINITÀ ELETTRONICA} = E_0 - E_C$

↓  
nel Si  $q\chi = 4.05 \text{ eV}$

→ Nel Si:  $q\Phi_{Si} = \text{LAVORO DI ESTRAZIONE} = q\chi + \frac{E_g}{2} = 4.05 + \left(\frac{1.12}{2}\right) = 4.61 \text{ eV}$

AFFINITÀ ELETTRONICA

$q\chi_{Si} = 4.61 \text{ eV}$

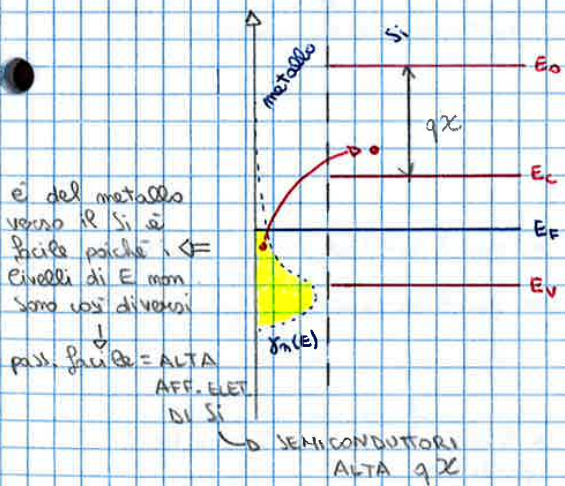
silicio (semic.)

$q\chi_{SiO_2} = 0.8 \text{ eV}$

Biossido di silicio (isolante)

Perché meglio isolanti l'affinità elettronica è così piccola rispetto ai semiconduttori?

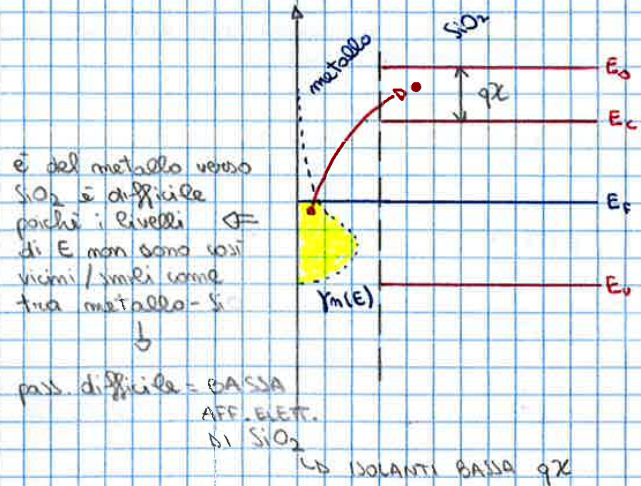
Metto a contatto un metallo prima con Si e poi con  $SiO_2$



è del metallo verso il Si è facile poiché i livelli di E non sono così diversi

↓  
pass. facile = ALTA  
AFF. ELET. DI SI

SEMICONDUCTORI ALTA  $q\chi$

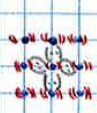


è del metallo verso  $SiO_2$  è difficile poiché i livelli di E non sono così vicini / simili come tra metallo-Si

↓  
pass. difficile = BASSA  
AFF. ELET. DI  $SiO_2$

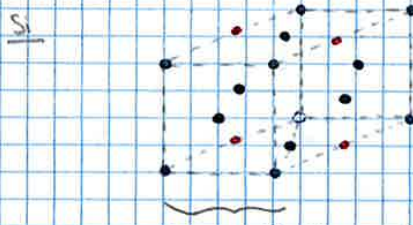
ISOLANTI BASSA  $q\chi$





Si = legame cov. del Si con i 4 atomi accanto a livello plomace (in 3s sono 6)  
 « v = vibrazioni atomiche »

un e si stacca e va in BC (generazione termica)



(è un cubo)

= reticolo a facce centrate e a corpo centrato

d = lato reticolare di Si = 5.43 Å

$$\frac{\sum_{i=1}^{\infty} e^- \cdot \text{contatto}}{(d)^3} = D = \frac{8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot 1}{(5.43 \cdot 10^{-8})^3} = \frac{4+3+4}{5.43 \cdot 10^{-24}} = 4.9 \cdot 10^{22} \gg 1.45 \cdot 10^{10} \text{ NULLA!}$$

**DAJE!** ⇒ il numero di e<sup>-</sup> nel Si fatto dalla g<sub>th</sub> è **INFINITESIMO**

$$\left( \begin{array}{l} 4.9 \cdot 10^{22} \gg 1.45 \cdot 10^{10} \\ \frac{e^-}{\text{cm}^3} \text{ in Si} \gg \frac{e^-}{\text{cm}^3} \text{ in g}_{th} \text{ in Si} \end{array} \right)$$

**CALCOLO DI n<sub>i</sub> IN FUNZIONE DI T**

\* Assumiamo  $E_g(T) \approx E_g(300) = 1.12 \text{ eV}$  per Si

**NO** è errato in realtà poiché se T aumenta g<sub>th</sub> aumenta e E<sub>g</sub> diminuisce  
 E<sub>g</sub>(0) ≠ E<sub>g</sub>(300)

$$N_c = \frac{2\pi (2 m_n^* kT)^{3/2}}{h^3}$$

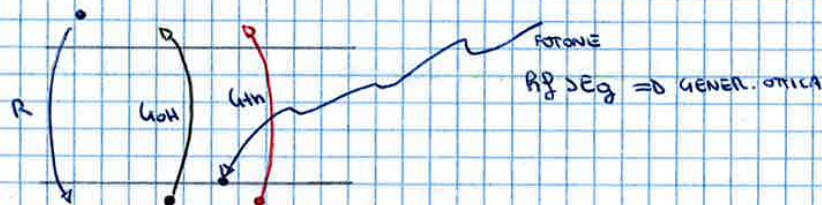
$$N_v = \frac{2\pi (2 m_p^* kT)^{3/2}}{h^3}$$

\* calcolo ad un'altra T ≠ 300K. Per esempio T = 300 K:

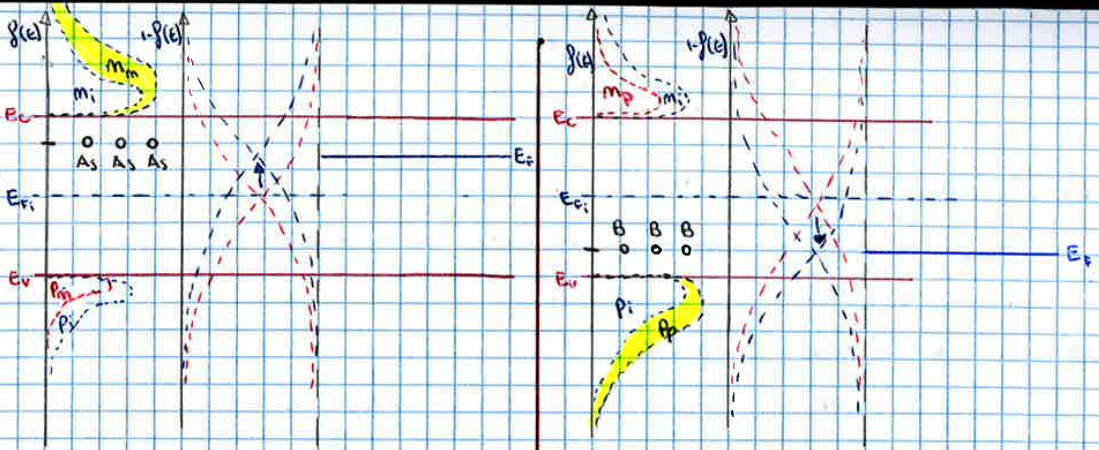
$$n_i(T) = \left( N_c(300) \cdot \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot N_v(300) \cdot \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} \right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$= N_c(300) \cdot N_v(300) \cdot \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

**INB!** Sapendo che  $n_{i, Si} = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ e}^-/\text{cm}^3$  a 300 K in g<sub>th</sub> e sapendo che  $n_{i, \text{Metallo}} = 10^{21} - 10^{22} \text{ e}^-/\text{cm}^3$ , faccio un atto di generosità a chiamarlo semiconduttore (di fatto i molti ordini di grandezza di differenza me lo fanno considerare isolante)



Devo trovare un altro sistema per aumentare le concentrazioni di e<sup>-</sup> partenti da BV a BC



Dato che  $m_m$  in BC aumenta posso dire che  $E_f$  per semiconduttori drogati <sup>(m)</sup> si ALZERA  
 ↓  
 Come conseguenza non può che diminuire la concentrazione di  $p_m$  in BV

Dato che  $p_p$  in BV aumenta posso dire che  $E_f$  per semiconduttori drogati <sup>(p)</sup> si ABBASSERA  
 ↓  
 Come conseguenza non può che diminuire la concentrazione di  $m_p$  in BC

Da cui:

$$m_m p_m = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$$

$$= N_v \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$$

$$= N_c N_v e^{-E_g/kT}$$

$$m_m p_m = m_i^2$$

Da cui:

$$m_p p_p = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$$

$$= N_v \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$$

$$= N_c N_v e^{-E_g/kT}$$

$$m_p p_p = m_i^2$$

LEGGE DELL'AZIONE  
 DI MASSA

$$p(x) = +q(p_{m0}(x) + N_D^+(x) - m_{m0}(x)) = 0$$

$$p(x) = +q(p_{p0}(x) - N_A^-(x) - m_{p0}(x)) = 0$$

**CALCOLO DELLE CONCENTRAZIONI DI N E P**

**$m_{m0}$  e  $p_{m0}$**

- Sistema 2 equazioni in due incognite
- $m_{m0} \cdot p_{m0} = n_i^2(T)$  ↳ temperatura
  - $+q(p_{m0} + N_D^+(T) - m_{m0}) = 0$

calcolo conc. dei maggioritari ( $m_{m0}$ )

$$p_{m0} = \frac{n_i^2(T)}{m_{m0}}$$

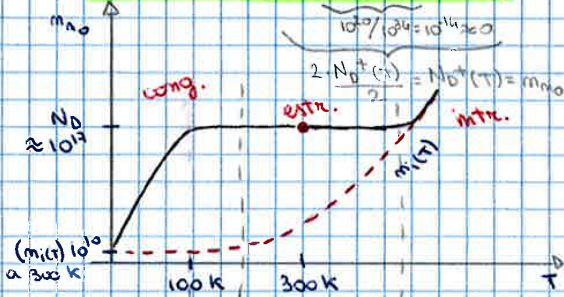
$$+q\left(\frac{n_i^2(T)}{m_{m0}} + N_D^+(T) - m_{m0}\right) = 0$$

$$+q\left(-m_{m0}^2 - N_D^+ m_{m0} - n_i^2(T)\right) = 0$$

$$m_{m0} = \frac{N_D^+(T)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_D^+(T)}{2}\right)^2 + n_i^2(T)}$$

no secondo valore esistente (+)

$$m_{m0} = \frac{N_D^+(T)}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_D^+(T)}\right)^2} + 1 \right)$$



\* attorno a  $200 \lesssim T \lesssim 600$  K  $\rightarrow m_{m0} \approx N_D$

**ZONA ESTRINSECA**

\* attorno a  $T > 600$  K  $\rightarrow m_{m0} \approx n_i$

**ZONA INTRINSECA** (si comporta come il semicond. intrinseco)

\* attorno a  $T < 200$  K  $\rightarrow m_{m0} \approx N_D^+$

**ZONA CONGELAMENTO**

**$m_{p0}$  e  $p_{p0}$**

- $m_{p0} \cdot p_{p0} = n_i^2(T)$  ↳ temperatura
- $+q(p_{p0} - m_{p0} - N_A^-(T)) = 0$

calcolo conc. dei maggioritari ( $p_{p0}$ )

$$m_{p0} = \frac{n_i^2(T)}{p_{p0}}$$

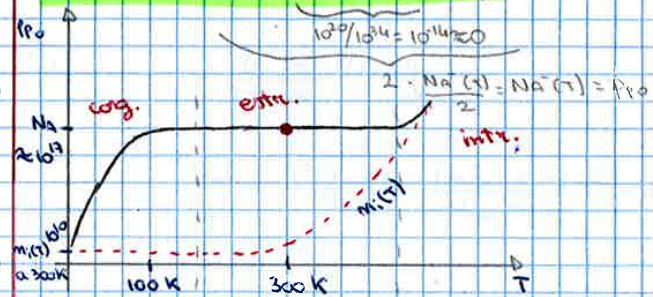
$$+q\left(p_{p0} - \frac{n_i^2(T)}{p_{p0}} - N_A^-(T)\right) = 0$$

$$+q\left(p_{p0}^2 - n_i^2(T) - N_A^-(T) p_{p0}\right) = 0$$

$$p_{p0} = \frac{N_A^-(T)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_A^-(T)}{2}\right)^2 + n_i^2(T)}$$

secondo valore esistente (+)

$$p_{p0} = \frac{N_A^-(T)}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_A^-(T)}\right)^2} + 1 \right)$$



\* attorno a  $200 \lesssim T \lesssim 600$  K  $\rightarrow p_{p0} \approx N_A$

**ZONA ESTRINSECA**

(zona migliore per l'efficienza del diodo c. poiché facilmente determino p<sub>p0</sub>)

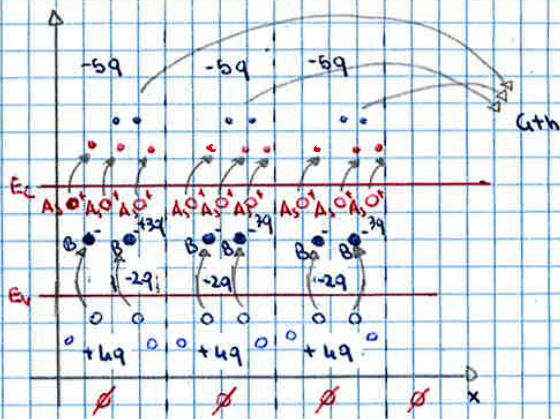
\* attorno a  $T > 600$  K  $\rightarrow p_{p0} \approx n_i(T)$

**ZONA INTRINSECA**

\* attorno a  $T < 200$  K  $\rightarrow p_{p0} \approx N_A^-$

**ZONA CONGELAMENTO**

COMPENSAZIONE IMPURITÀ DROGANTE



$$E_c = -5q$$

$$E_v = +3q - 2q = +1q$$

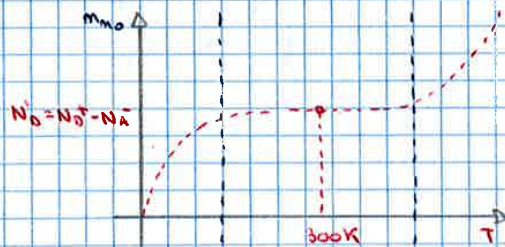
sistema  $\begin{cases} p(x) = +q(p(x) + N_D^+(x) - m(x) - N_A^-(x)) = \cancel{\neq} \\ m \cdot p = n_i^2 \end{cases}$  \* il livello di Fermi  $E_f$  resta unico

CASO 1)  $N_D^+(T) > N_A^-(T)$

$$\begin{cases} p(x) = +q(p(x) + N_D^+(x) - m(x)) = \cancel{\neq} \\ p_0 \cdot m_0 = n_i^2(T) \end{cases}$$

con  $N_D^+(T) = N_D^+(T) - N_A^-(T)$

riottiene lo stesso risultato



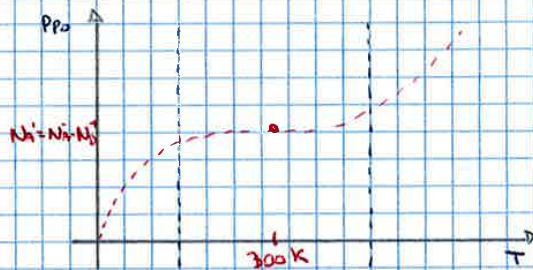
$N_D = 10^{17}$   $N_A = 10^{16}$   
 è come se  $N_D = 9 \cdot 10^{16}$

CASO 2)  $N_A^-(T) > N_D^+(T)$

$$\begin{cases} p(x) = +q(p_0(T) - m_0(T) - N_A^-(T)) = \cancel{\neq} \\ p_0 \cdot m_0 = n_i^2(T) \end{cases}$$

con  $N_A^-(T) = N_A^-(T) - N_D^+(T)$

riottiene lo stesso risultato



⇒ VEDREMO CHE L'AUMENTO DI UNO O DELL'ALTRO DROGANTE PORTA EFFETTI COLLATERALI

**EQUAZIONI DI SHOCKLEY**

1)  $n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$  per un semiconduttore intrinseco  $\rightarrow$  3)  $n_i = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$

2)  $p = N_v \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$  per un semiconduttore intrinseco  $\rightarrow$  4)  $p_i = N_v \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$

Dalla 3)  $N_c = n_i \cdot e^{\frac{E_c - E_f}{kT}}$  (5)

Dalla 4)  $N_v = p_i \cdot e^{\frac{E_f - E_v}{kT}}$  (6)

Sostituisco 5 in 1:

$$n = n_i \cdot e^{\frac{E_c - E_f}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}}$$

$n = n_i \cdot e^{\frac{E_f - E_f}{kT}}$  = 1<sup>a</sup> eqz. di Shockley

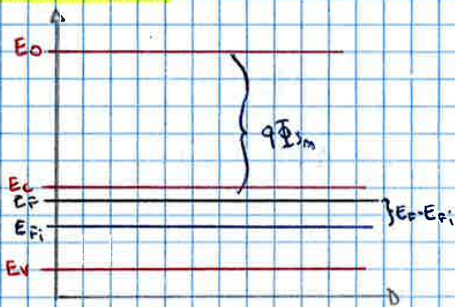
Sostituisco 6 in 2:

$$p = p_i \cdot e^{\frac{E_f - E_v}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}}$$

$p = p_i \cdot e^{\frac{E_f - E_f}{kT}}$  = 2<sup>a</sup> eqz. di Shockley

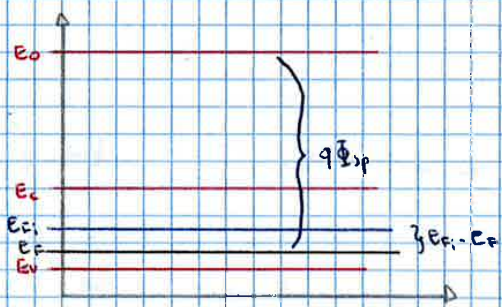
- NB:**
- Usano entrambe  $E_f$  come livello di riferimento
  - Non ho più  $N_c$  e  $N_v$  ma ho  $n_i$  che è costante e lo so
  - Sono uguali a meno di un segno  $\rightarrow$  recupero una simmetria intrinseca

**LAVORI DI ESTRAZIONE**



$$n_{n0} = N_d = n_i \cdot e^{\frac{E_f - E_{fi}}{kT}}$$

$q\Phi_m = q\chi + \frac{E_g}{2} - kT \cdot \log \frac{N_d}{n_i}$

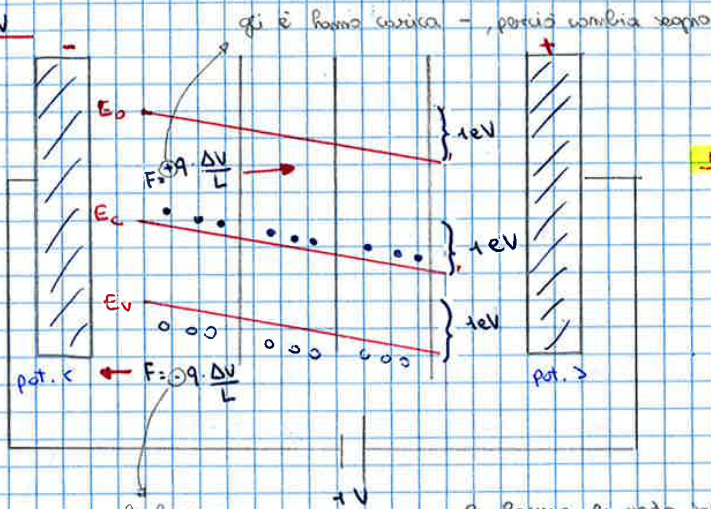


$$p_{p0} = N_a = n_i \cdot e^{\frac{E_{ci} - E_f}{kT}}$$

$q\Phi_{sp} = q\chi + \frac{E_g}{2} + kT \cdot \log \frac{N_a}{n_i}$

queste considerazioni mi portano a vedere i diagrammi a bande come le rappresentazioni delle  $E_p(U)$  degli  $e^-$  in ogni loro punto.

se  $\Delta V = 1V$

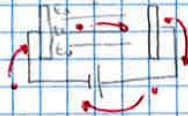


**NB.** il diagramma a bande di fatto rappresenta il grafico dell'energia potenziale dell' $e^-$

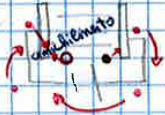
La lacuna come carica + perciò la forza dovuta da  $\Delta V$  sarà negativa  $-q \frac{\Delta V}{L}$

La lacuna  $e^-$  vede barriere solo xk il diagramma a bande è convenzionalmente per  $e^-$ , in realtà la lacuna  $e^+$  vanno a potenziale minimo anche se valgono

- L'elettrone gira in senso orario



- La lacuna invece si + comprime perché quando tocca il metallo del condensatore si ammicchisce. L'unica possibilità per cui la concentrazione di lacune di BV tutti uguali è che vengono create nuove lacune sul contatto opposto (dx); Per farlo sottraggio un  $e^-$  da dx, che percorrendo il conduttore ammicchisce con lacuna corrispondente



Questo meccanismo può mantenersi perpetuo nel tempo perché  $e^-$  della BV viene preso dal metallo e percorrendo il circuito si ricrea l'equilibrio

⇒ il campo Elettrico  $E$  non varia le concentrazioni di  $e^-$  ed  $e^+$  (variano ma l'eq. è ristabilito immediatamente), formano che io abbia dei buchi contatti

### CORRENTI DI TRASCINAMENTO (DRIFT CURRENT)

$j$  = densità di corrente (A/cm<sup>2</sup>)

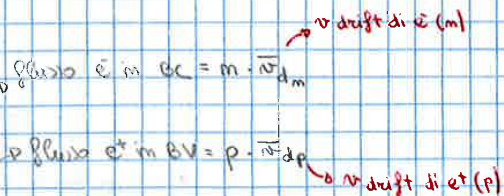
$I = j \cdot S =$  corrente (A)

$J_n$  = densità di corrente di  $e^- = -q \cdot \Phi_{xBC}$

$J_p$  = " " " "  $e^+ = +q \cdot \Phi_{xBV}$

$J_n = -q \cdot n \cdot \bar{v}_{dn}$

$J_p = q \cdot p \cdot \bar{v}_{dp}$



HO TUTTI I VALORI PER CALCOLARE  $J_n$  e  $J_p$ , MENO  $\bar{v}_{dp}$  e  $\bar{v}_{dn}$

$$\bar{v}_{drift} = - \frac{q \tau_m \cdot E}{m_m^*}$$

$\mu_m =$  mobilità dell'elettrone  $\rightarrow$  Dato che  $v$  è costante fa sì che la mobilità non sia assimilabile con il moto degli e nello spazio vuoto

Essa dipende sempre da  $\lambda$  e da  $T$  come prima:

- $\mu_m \downarrow$  se  $T \uparrow, N_A \uparrow, N_D \uparrow$
- $\mu_m \uparrow$  se  $m_m^* \downarrow$

**$\Rightarrow$  APPLICAZIONE TEOREMA IMPULSO (per tutte le e<sup>-</sup> di quella popolazione)**

$$F \cdot \tau_p = m_p^* \cdot \bar{v}_{drift p}$$

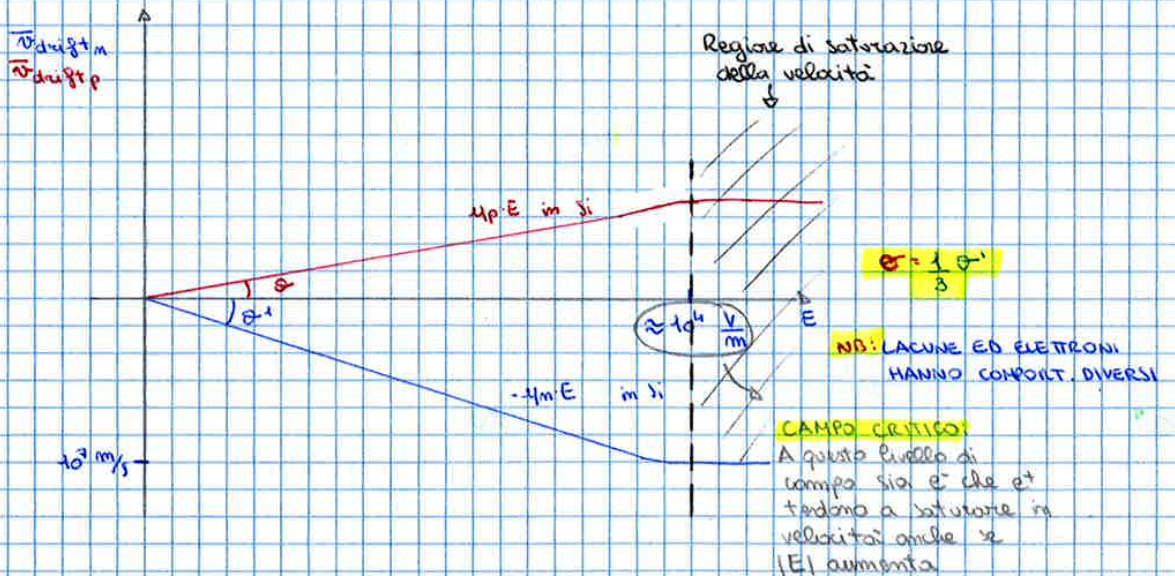
$$q \cdot E \cdot \tau_p = m_p^* \cdot \bar{v}_{drift p}$$

$$\bar{v}_{drift p} = \frac{q \cdot \tau_p \cdot E}{m_p^*}$$

$\mu_p =$  mobilità lacune

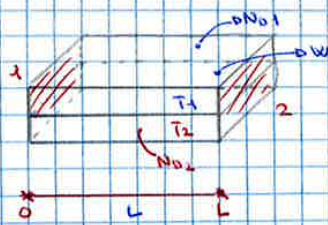
Essa dipende sempre da  $\lambda$  e da  $T$  come prima:

- $\mu_p \downarrow$  se  $T \uparrow, N_A \uparrow, N_D \uparrow$
- $\mu_p \uparrow$  se  $m_p^* \downarrow$



**NB**

Dato che a bassi campi avevo assunto  $\bar{v}_{drift} \ll v_{th}$ , ad alti campi  $E$  questa ipotesi inizia a scricchiolare. Dunque interviene la velocità di saturazione

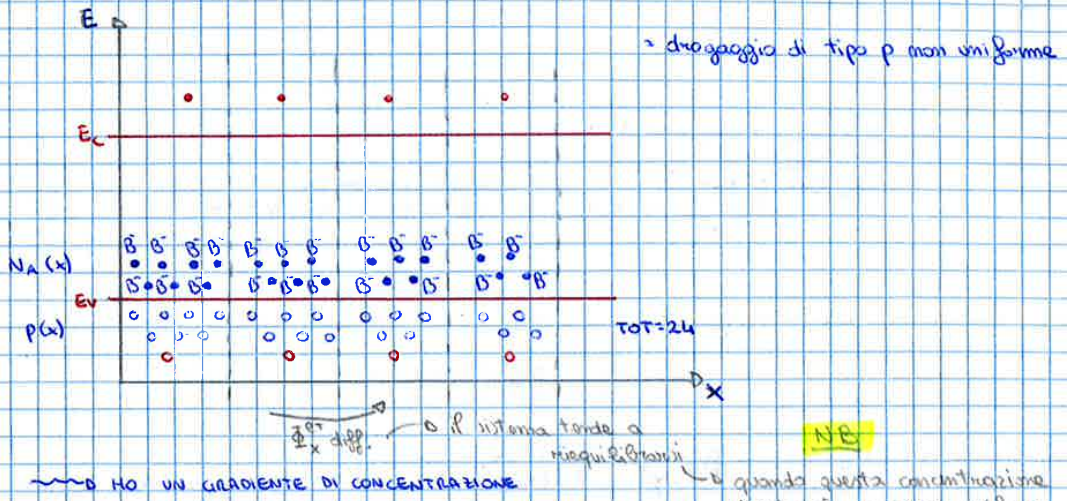


$$U_{12} = \underbrace{\frac{\sigma_1 W T_1}{L}}_{\text{contributo 1}} + \underbrace{\frac{\sigma_2 W T_2}{L}}_{\text{contributo 2}}$$



**NON UNIFORMITÀ E DISTRIBUZIONE DI CARICHE**

Finora abbiamo sempre assunto che le cariche fossero uniformemente distribuite, una succede all'altra non è vero?

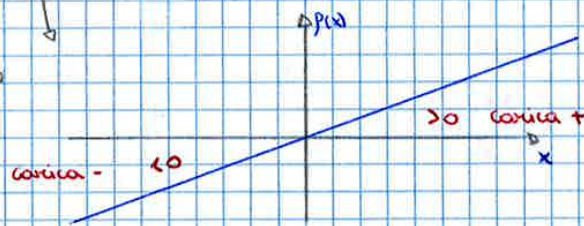
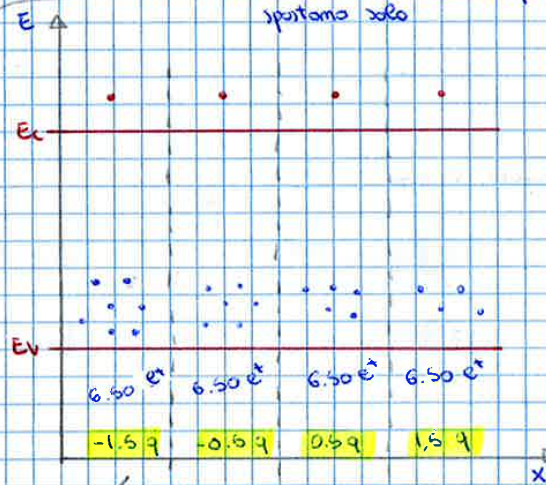


NON UN GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE

quando questa concentrazione tenderà ad essere uniforme avrà il  $\Delta \phi$  fatto non avrà una neutralità locale

a  $T = t_0$  :  $\rho(x) \neq 0$  &  $\Delta \phi$  fatto

a  $T = t_{\infty}$  :  $\rho(x) \neq 0$  &  $\Delta \phi$  fatto o comunque non locale nel complesso. La neutralità TOTALE si avrà globalmente se si portano x0

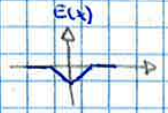


⇒ La non uniformità di dragaggio diventa non uniformità dei portatori, per cui non avrà neutralità locale

INTEGRANDO HO  $E(x)$ :

$$E(x) \begin{cases} -\infty < x < -x_1 & E(x) = E(-\infty) + \int_{-\infty}^x \frac{p(x)}{E_s} dx = \emptyset \\ -x_1 < x < 0 & E(x) = E(x_1) + \int_{x_1}^x \frac{-p_1(x)}{E_s} dx = -\frac{p_1(x+x_1)}{E_s} = -\frac{p_1(x+x_1)}{E_s} \\ 0 < x < x_2 & E(x) = E(\emptyset) + \int_0^x \frac{p_2(x)}{E_s} dx = -\frac{p_1(x_1)}{E_s} + \frac{p_2(x_2)}{E_s} = \emptyset \\ x_2 < x < +\infty & E(x) = \emptyset \end{cases}$$

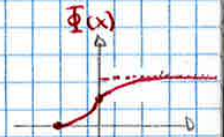
come regione 1



INTEGRANDO HO  $\Phi(x)$ :

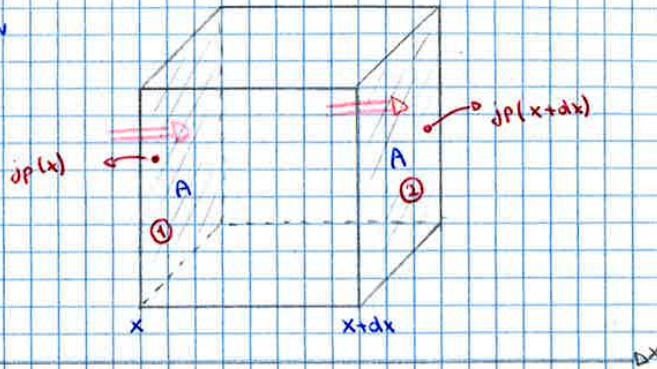
$$\Phi(x) \begin{cases} -\infty < x < -x_1 & \Phi(x) = \Phi(-\infty) + \int_{-\infty}^x 0 dx = \emptyset \\ -x_1 < x < 0 & \Phi(x) = \Phi(-x_1) + \int_{-x_1}^x \frac{p_1(x)}{E_s} dx = +\frac{p_1(x+x_1)^2}{E_s \cdot 2} \\ 0 < x < x_2 & \Phi(x) = \Phi(0) + \int_0^x \frac{p_1(x_1)}{E_s} - \frac{p_2}{E_s} x dx = \frac{p_1(x+x_1)^2}{E_s \cdot 2} + \frac{p_1}{E_s} x x_1 - \frac{p_2}{E_s} \frac{x^2}{2} \\ x_2 < x < +\infty & \Phi(x) = \Phi(x_2) + \int_x^{+\infty} 0 dx = \frac{p_1}{E_s} \frac{x_1^2}{2} + \frac{p_2}{E_s} \frac{x_2^2}{2} \end{cases}$$

E completa di segno



**EQUAZIONI DI CONTINUITÀ** → sono equazioni di conservazione per le cariche ottenute da un bilanciamento, in particolare bilanci di cariche attraverso superfici (flussi)

**CASO 1)  $e^+$  in BV**



\* Nella faccia 1:

entrano  $\frac{j_p(x) \cdot A}{+q}$  lacune al secondo

\* Nella faccia 2:

escono  $\frac{j_p(x+dx) \cdot A}{+q}$  lacune al secondo

**NB:** Definiamo  $R - G_{th} = U_p$  che è il tasso netto di ricombinazione di  $e^-$

$$\Rightarrow \frac{dP}{dt} \cdot A \cdot dx = \underbrace{\frac{j_p(x) \cdot A}{+q}}_{\substack{\text{variazione di} \\ \text{lacune nel tempo} \\ \text{attraverso } A \cdot dx}} - \underbrace{\frac{j_p(x+dx) \cdot A}{+q}}_{\substack{\text{lacune} \\ \text{uscite}}} + \underbrace{G_{th} \cdot A \cdot dx}_{\substack{\text{generazione} \\ \text{termica}}} - \underbrace{R \cdot A \cdot dx}_{\substack{\text{ricombinazione}}} = \text{BILANCIO DELLE LACUNE NEL VOLUME } A \cdot dx$$

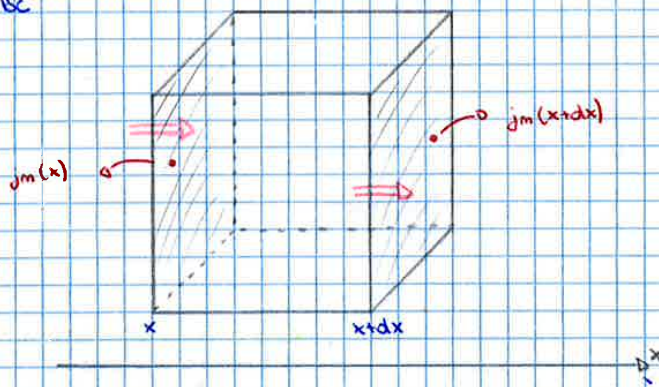
$$\frac{dP}{dt} A \cdot dx = \frac{j_p(x) \cdot A}{+q} - \frac{j_p(x+dx) \cdot A}{+q} - \frac{d j_p(x)}{dx} \cdot \frac{A \cdot dx}{q} - U_p A \cdot dx$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{1}{q} \cdot \frac{d j_p(x)}{dx} - U_p$$

**EQ. CONTINUITÀ PER  $e^+$**

→ se c'è una variazione di corrente, allora c'è anche una variazione di carica

**CASO 2)  $e^-$  in BV**



\* Nella faccia 1:

entrano  $\frac{j_m(x) \cdot A}{-q}$  elettroni al secondo

\* Nella faccia 2:

escono  $\frac{j_m(x+dx) \cdot A}{-q}$  elettroni al secondo

**NB:** Definiamo  $R - G_{th} = U_m$  come il tasso netto di ricombinazione di  $e^+$

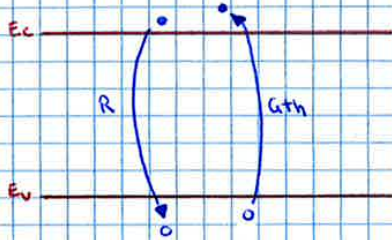
⇒ con gli stessi passaggi di prima (bilancio) ottengo:  $\frac{dM}{dt} = +\frac{1}{q} \cdot \frac{d j_m(x)}{dx} - U_m$  **EQ. CONTINUITÀ PER  $e^-$**

**NB** Posso fare le stesse considerazioni per un semiconduttore drogato di tipo P

**PASSO LIVELLO DI INIEZIONE**

N:  $n_m \approx n_{m0}$   $p_m \gg p_{m0}$   
 P:  $p_p \approx p_{p0}$   $m_p \gg m_{p0}$

→ INALTERATE LE CONC. DEI MAGGIORITARI



$R = \alpha \cdot n \cdot p$   
 α costante che equilibra il tutto

All'equilibrio:  $R_0 = G_{th}$

**TIPO N)**  $R_0 = \alpha \cdot n_{m0} \cdot p_{m0} = G_{th}$

**TIPO P)**  $R_0 = \alpha \cdot p_{p0} \cdot m_{p0} = G_{th}$

Fuori equilibrio:

**TIPO N)** se  $T = \text{costante}$   $G_{th} = \alpha \cdot n_{m0} \cdot p_{m0}$  resta invariata,

ma  $R \neq R_0 \rightarrow R = \alpha \cdot n_m \cdot p_m$  **A BASSO LIVELLO DI INIEZIONE**  
 $n_m \approx n_{m0}$

$U_p = R - G_{th} = \alpha \cdot n_m \cdot p_m - \alpha \cdot n_{m0} \cdot p_{m0} = \alpha \cdot n_{m0} (p_m - p_{m0})$

escono di lacune in un semiconduttore drogato  $n = p'$

$U_p = \alpha \cdot n_{m0} \cdot p_m$  → all'equilibrio  $p_m = p_{m0}$ , quindi  $U_p = 0$ ,  $R = G_{th}$

**NB:**  $\frac{1}{\alpha n_0} = \tau_p$  → TEMPO DI VITA DELLE LACUNE, TEMPO CHE INTERCORRE TRA GEN. E RICOMB. DI LACUNE

$U_p = \frac{p'_m}{\tau_p}$

**TIPO P)** con gli stessi ragionamenti

se  $T = \text{costante}$   $G_{th} = \alpha \cdot m_{p0} \cdot p_{p0}$  resta invariata,

ma  $R \neq R_0 \rightarrow R = \alpha \cdot p_{p0} \cdot m_p$  **A BASSO LIVELLO DI INIEZ.**

$U_m = R - G_{th} = \alpha \cdot p_{p0} \cdot m_p - \alpha \cdot p_{p0} \cdot m_{p0} = \alpha \cdot p_{p0} (m_p - m_{p0})$

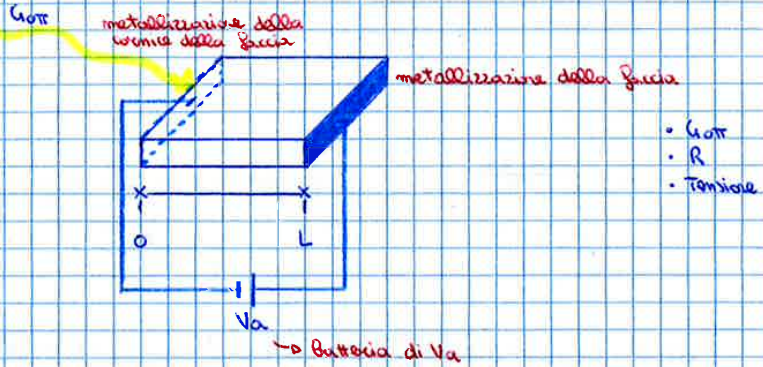
escono di e<sup>-</sup> nel semicond. drogato  $p = m'$

$U_m = \alpha \cdot p_{p0} \cdot m'_p$  → all'equilibrio  $m'_p = 0$  quindi  $U_m = 0$  e  $R = G_{th}$

**NB:**  $\frac{1}{\alpha n_0} = \tau_m$  → TEMPO DI VITA DEGLI ELETTRONI

$U_m = \frac{m'_p}{\tau_m}$

- 1.5) Si ripeta 1.4) con  $L = 50$  micron
- 1.6) Si ripeta 1.4) con  $L = 5$  micron
- 1.7) Si ripeta 1.4) nelle seguenti condizioni:



al variazione di  $V_a$  (positivamente e negativamente)

1.1)  $p_{p0}(300)$ ,  $m_{p0}(300)$ , diaapomma a bande,  $R(300)$

A livello teorico essendo  $T = 300$  K sono in zona extrinseca, quindi  $N_A = p_{p0}$ .

Procedo però in modo + elegante:

stesso risultato

$$p_{p0}(T) = \frac{N_A^-(T)}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 m_i(T)}{N_A^-(T)} \right)^2} + 1 \right]$$

con  $B$   $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   $E_d$  di  $B = 30 \text{ meV}$   
 $N_A^-(300) = N_A$

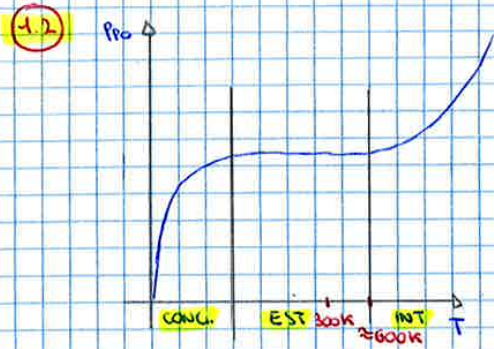
$$p_{p0}(T) = \frac{N_A}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 m_i(300)}{N_A} \right)^2} + 1 \right]$$

con  $m_i(300) = 1.65 \cdot 10^{10}$

$$p_{p0}(T) = \frac{N_A}{2} \cdot 2 = N_A = 10^{16}$$

$$m_{p0} = \frac{m_i^2(300)}{p_{p0}(300)} = \frac{(1.65 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.7 \cdot 10^4$$

$$\frac{p_{p0}}{m_{p0}} = \frac{10^{16}}{2.7 \cdot 10^4} = 3.7 \cdot 10^{11} \quad (= \text{rapporto tra maggioritari e minoritari})$$



a 600K devo fare attenzione a come sono i maggioritari perché sono a cavallo tra le due zone e non posso dire che  $p_{po}(600) \approx N_A$

$$p_{po}(600) = \frac{N_A}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2m_i(600)}{N_A} \right)^2} + 1 \right] \quad \text{con } N_A^-(600) = N_A$$

$m_i(600) ?$

$$m_i(T) = (N_c(T) \cdot N_v(T))^{1/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$= (N_c(300) \cdot N_v(300))^{1/2} \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

con  $N_c = \frac{2}{\pi^2} (2kT \pi m_n^* T)^{3/2}$  ed  $N_v = \frac{2}{\pi^2} (2kT \pi m_p^* T)^{3/2}$

da cui  $m_i(300) = K_{CV} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$        $K_{CV} = 1.45 \cdot 10^{10} \cdot e^{+\frac{1.12}{0.052}} = 3.28 \cdot 10^{14}$

IPOTESI:  $E_g(T) \approx E_g(300) = 1.12 \text{ eV}$

$m_i(600) = K_{CV} \left( \frac{600}{300} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{1.12}{0.104}} = 1.95 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \rightarrow$  aumento dei port. minoritari in BC

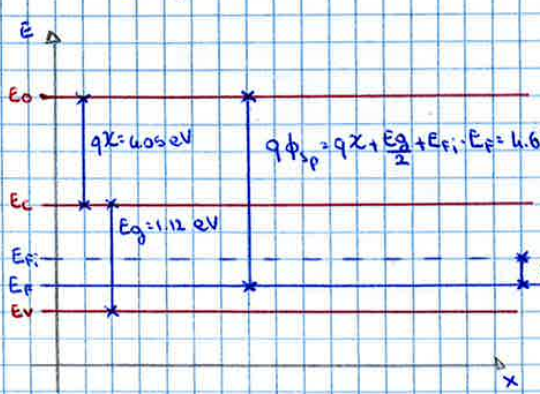
Da cui:  $p_{po} = \frac{10^{16}}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 \cdot 1.95 \cdot 10^{15}}{10^{16}} \right)^2} + 1 \right] = 1.03 \cdot 10^{16} \rightarrow$  la variazione non è grande ma a priori non potevo dire che  $p_{po}(600) \approx N_A$

$m_{po}(600) = \frac{m_i^2(600)}{p_{po}(600)} = \frac{(1.95 \cdot 10^{15})^2}{1.03 \cdot 10^{16}} = 3.69 \cdot 10^{14} \rightarrow$  la variazione dei minoritari è MOLTO GRANDE! Da  $10^4$  a  $10^{14}$

$\frac{p_{po}(600)}{m_{po}(600)} = 27.9 \rightarrow$  a 300K avevo un rapporto tra  $1.36 \cdot 10^4$

ora i minoritari danno contributo quasi come i maggioritari

valore del diagramma a bande a 600K:

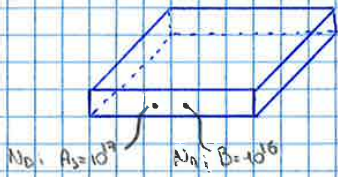


**NB:** al crescere della T il semiconduttore diventa anche ad ammettere conformazioni intrinseche, dunque  $E_f$  tende ad approssimarsi con  $E_i$

$E_f = E_i = kT \cdot \ln \left( \frac{p_{po}(600)}{m_i(600)} \right) = 0.052 \cdot \ln \left( \frac{1.03 \cdot 10^{16}}{1.95 \cdot 10^{15}} \right) = 0.0862 \text{ eV}$

DIMINUITO

1.3



Principio di compensazione:  $N_D > N_A$   $N_D' = N_D - N_A = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

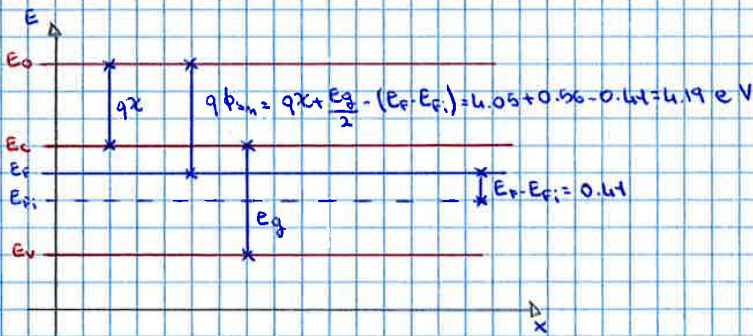
Calcolo di  $n_{no}(300)$  e  $p_{no}(300)$ :

$$n_{no}(300) = \frac{N_D - N_A}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{2 m_i(300)^2}{N_D - N_A}} + 1 \right] = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$N_D' = 9 \cdot 10^{16}$

$$p_{no}(300) = \frac{(1.45 \cdot 10^{-19})^2}{9 \cdot 10^{16}} = 2.3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

Calcolo del diagramma a bande a 300 K:

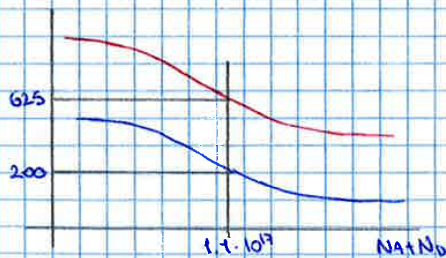


$$E_f - E_i(300) = kT \cdot \ln\left(\frac{n_{no}(300)}{n_i(300)}\right) = 0.41 \text{ eV}$$

Calcolo della resistenza:

Affidata solo agli  $e^-$  (13 ordini di grandezza maggiori)

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad \text{con } \rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{e } \sigma_p \ll \sigma_n$$



$$R = \frac{1}{9 \cdot 625 \cdot 9 \cdot 10^{16}} \cdot \frac{10^{-1}}{10^{-2}} = 1.1 \Omega \quad \text{ridotta}$$

Possio  $\frac{d^2 p_m}{dx^2} = \frac{p_m}{D_p \tau_p}$

MA...  $\sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{V_T \cdot \mu_p \cdot \tau_p} = (\underbrace{V_T \cdot \text{cm}^2 \cdot V_T \cdot \tau_p}_{\text{lunghezza}})$

LA RADICE DI  $D_p \tau_p$  RAPPRESENTA LA LUNGHEZZA DI DIFFUSIONE

NB:  $\sqrt{D_m \tau_m}$  è quella degli e<sup>-</sup>

$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

→ il polinomio caratteristico della differenziale è:

$\lambda^2 = \frac{1}{D_p \cdot \tau_p} \Rightarrow \lambda_{1,2} = \pm \frac{1}{L_p}$

$p_m(x) = A e^{+x/L_p} + B e^{-x/L_p}$

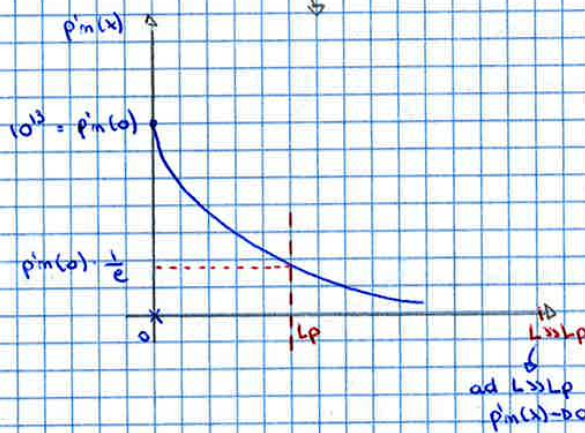
→ Approssimazione (chiesta a condizioni)

(IPOTESI) DI SEMICONDUTTORE LUNGO ( $L \gg L_p$ ):

$p_m(x) = A \cdot e^{+x/L_p} + B \cdot e^{-x/L_p}$

I eq. continuo) per  $x \rightarrow \infty$ ,  $p_m(x) = 0$  da cui  $p_m(x) = B \cdot e^{-x/L_p}$  II eq. continuo) con  $p_m(0) = p_0 = B = 10^{13}$

$p_m(x) = \underbrace{p_m(0)}_{\text{NOTO}} \cdot e^{-x/L_p}$

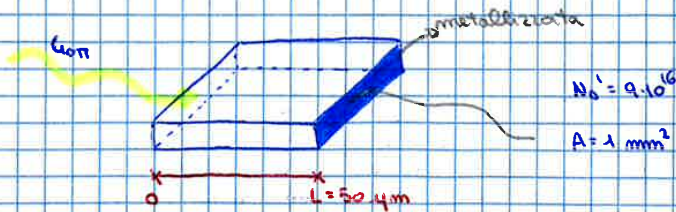


se  $x = L_p$  allora  $p_m(x) = p_m(0) e^{-x/L_p} = 10^{13} \cdot e^{-1} = 10^{13} \cdot 0.37 = 0.37 \cdot p_m(0)$

Possio  $L_p = \sqrt{V_T \cdot \mu_p (N_A + N_D) \cdot \tau_p} = \sqrt{0.026 \cdot 200 \cdot 10^6} = 2.28 \cdot 10^3 \text{ cm} = 22.8 \text{ } \mu\text{m} \ll L = 1000 \text{ } \mu\text{m} = 1 \text{ mm}$   
non si produce e funzione di



1.5



3/11/2016

Dal modello matematico:

- 1) Sistema stazionario :  $\frac{dp_m}{dx} = \phi$
- 2) Continua a volume e ipotesi di quasi neutralità :  $E(x) = \phi$
- 3) Condizioni al contorno:  $p_m(0) = 10^{13}$ , ma  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} < L$   
 $22.8 \mu\text{m}$     $50 \mu\text{m}$   
 quindi alla metallizzazione in  $x=L$  posso dire che:

$p_m(L) = \phi$

La metallizzazione fa sì che la faccia metallizzata a contatto con il semiconduttore in quantità di vapore gli e (tanti simili) del metallo per passaggio  $e^-$  e  $e^+$  = CONTINUITÀ del semiconduttore

$\frac{dp_m}{dx} = -\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_p(x)}{dx} - U_p$

$J_p(x) = q \cdot \mu_p \cdot p_m \cdot E - q D_p \frac{dp_m}{dx}$  = DRIFT DIFFUSION  
 $\phi$  per quasi neutralità

$U_p = -\frac{p_m}{\tau_p}$  = TASSO RICOMB. NETTA

$\Rightarrow \frac{d^2 p_m}{dx^2} = \frac{p_m}{D_p \tau_p}$

$\Rightarrow$  ottengo:  $p_m(x) = A \cdot e^{\frac{x}{L_p}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_p}}$

con condizioni al contorno:

- ①  $p_m(0) = \text{NOTO} = A+B$
- ②  $p_m(L) = \phi = A \cdot e^{\frac{L}{L_p}} + B \cdot e^{-\frac{L}{L_p}}$

Dalla ②  $B = -\frac{A \cdot e^{\frac{L}{L_p}}}{e^{-\frac{L}{L_p}}}$  sostituisco in ① e trovo A:

$p_m(0) = A - \frac{A \cdot e^{\frac{L}{L_p}}}{e^{-\frac{L}{L_p}}} = \frac{A(e^{-\frac{L}{L_p}} - e^{\frac{L}{L_p}})}{e^{-\frac{L}{L_p}}}$

$A = -p_m(0) \frac{e^{-\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}}$

$B = p_m(0) - A = p_m(0) + p_m(0) \frac{e^{-\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}}$

$B = p_m(0) \frac{(e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}) + e^{-\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}} = \frac{p_m(0) \cdot e^{\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}}$

Da cui...

$p_m(x) = -p_m(0) \frac{e^{-\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}} \cdot e^{\frac{x}{L_p}} + p_m(0) \frac{e^{\frac{L}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}} \cdot e^{-\frac{x}{L_p}}$

$p_m(x) = p_m(0) \frac{e^{\frac{L-x}{L_p}} - e^{-\frac{L-x}{L_p}}}{e^{\frac{L}{L_p}} - e^{-\frac{L}{L_p}}}$

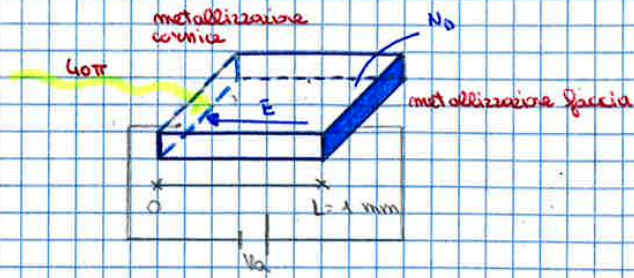
$p_m(x) = \frac{\sinh \frac{L-x}{L_p}}{\sinh \frac{L}{L_p}} p_m(0)$

$p_m(x) = \frac{\sinh \frac{L-x}{L_p}}{\sinh \frac{L}{L_p}}$

soluzione generale  $\forall L$  del semiconduttore

1.7

Ritorno al caso 1.4



Vale regime stazionario

Vale che  $p(x) = 0$

Non vale la quasi neutralità poiché c'è la batteria  $\rightarrow E(x) = -\frac{V_0}{L}$

Per le condizioni al contorno:  $p'(0) = \text{NOTO}$   
 $p'(L) = 0$  poiché  $L \gg L_p$  (semiconduttore lungo)

Applico il modello:

$$\textcircled{1} \frac{d^2 p'(x)}{dx^2} = -\frac{1}{q} \frac{d J_p(x)}{dx} - U_p = \text{CONTINUITÀ}$$

$$\textcircled{2} J_p(x) = +q \mu_p p_m E(x) - q D_p \frac{d p_m}{dx} = \text{DRIFT DIFFUSION}$$

$$\textcircled{3} E(x) = -\frac{V_0}{L} = \text{CAMPO ESTERNO}$$

$$\textcircled{4} D_p = V_T \cdot \mu_p$$

$$\textcircled{5} U_p = \frac{p'_m}{\tau_p}$$

4-11-2014

Sostituendo 2 e 4 in 1:

$$0 = \mu_p \frac{V_0}{L} \cdot \frac{d p'_m}{dx} + D_p \frac{d^2 p'_m}{dx^2} - \frac{p'_m}{\tau_p} \quad p_m = p'_m$$

dividendo tutto per  $D_p$ :

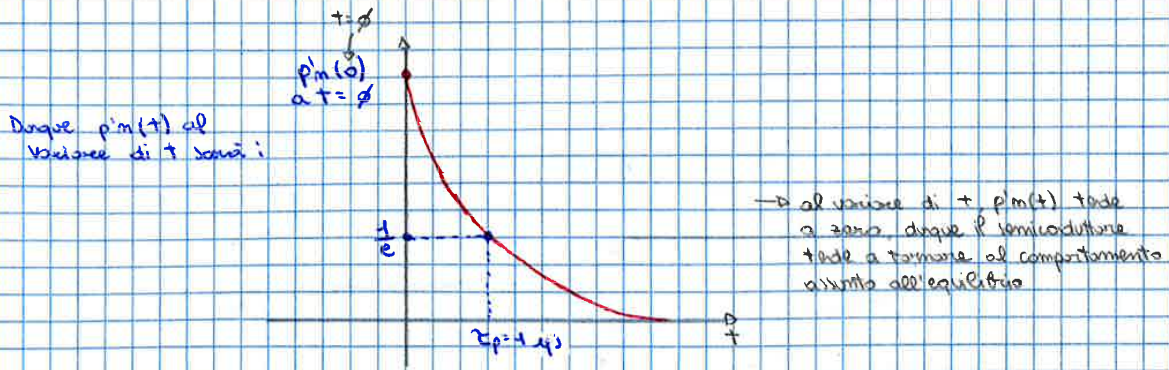
$$\frac{d^2 p'_m}{dx^2} + \frac{\mu_p V_0}{D_p L} \frac{d p'_m}{dx} - \frac{p'_m}{D_p \tau_p} = 0$$

$$D_p = V_T \cdot \mu_p$$

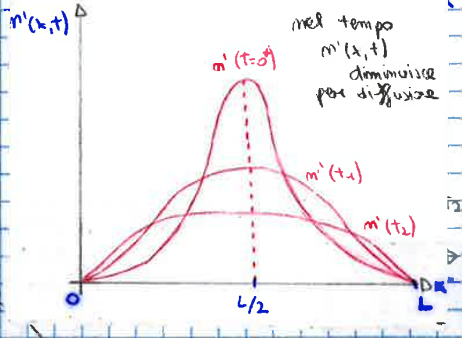
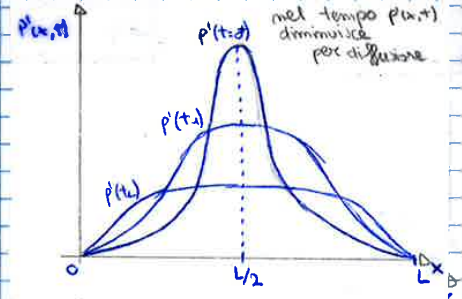
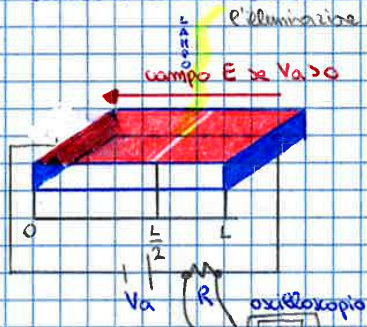
$$\frac{d^2 p'_m}{dx^2} + \frac{V_0}{V_T L} \frac{d p'_m}{dx} - \frac{p'_m}{L^2 \mu_p \tau_p} = 0$$

polinomio caratteristico:  $\lambda^2 + \frac{V_0}{V_T L} \lambda - \frac{1}{L^2 \mu_p \tau_p} = 0$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-V_0}{2V_T L} \pm \sqrt{\left(\frac{V_0}{2V_T L}\right)^2 + \frac{1}{L^2 \mu_p \tau_p}}$$



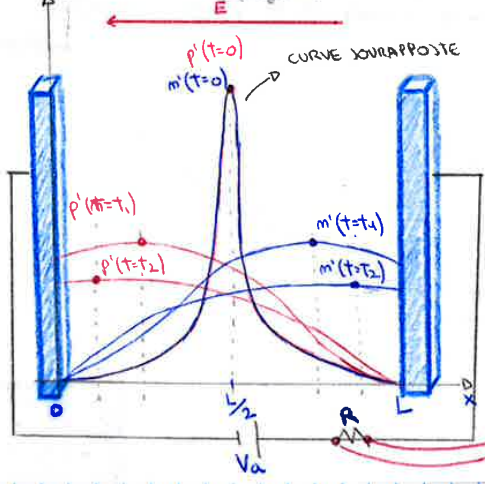
H e I hanno preso una bacchetta di semiconduttore (Ge) e ne hanno metallizzato le facce laterali. Su tutta la superficie è posto un film ossidante con una fenditura ad  $L/2$ . Le facce metallizzate sono collegate ad una batteria con resistenza in serie ai cui capi attacco un oscilloscopio



$V_A = \phi$

**VASO**

Ho un campo elettrico che spinge  $e^-$  nel suo verso ed  $e^+$  in quello opposto



\* COLORI INERTITI RISPETTO AL GRAFICO PRECEDENTE  
 $e^-$  in blu  
 $e^+$  in rosso

**RISULTATO H e J!**  
 posso misurare tutti i parametri dei semiconduttori come mobilità, tempi di vita, velocità di deriva

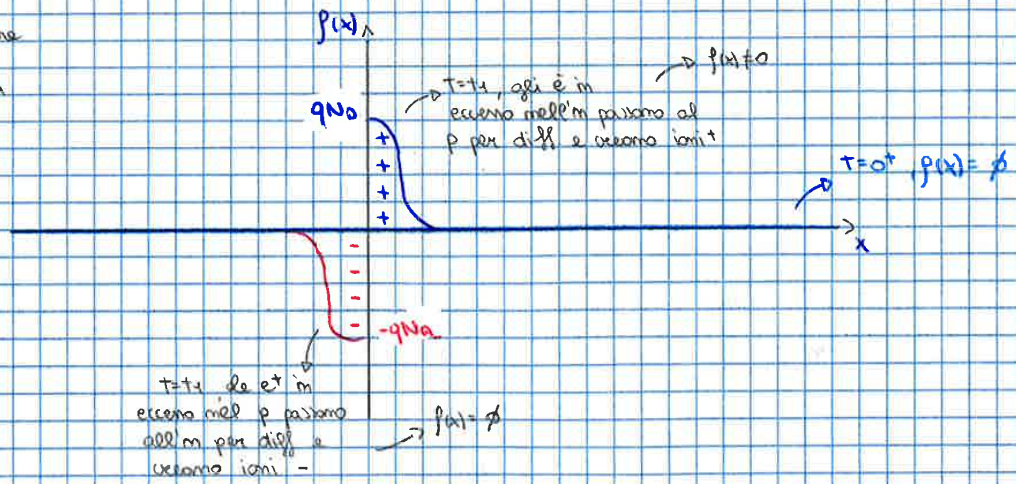
nell'oscilloscopio vedo l'inviluppo degli  $e^-$ , che sono quelli che si spacciano contro la faccia metallica che li attira

trasformazione degli  $e^-$  che entrano nel metallo in correnti di transinamento. Il piccolo  $E^0$  presente fa loro fare il giro

allo stesso modo vedo  $e^+$

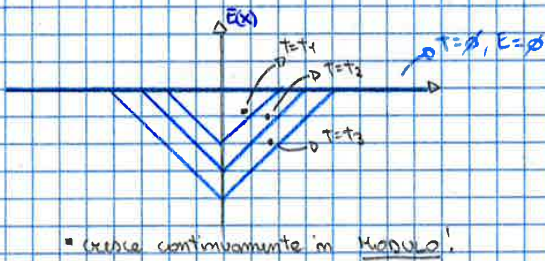
il giro di  $e^-$  fa sì che si annichiscano  $e^+$  nell'altro lato della faccia metallizzata a sx

NB: massima concentrazione possibile di portatori al drogaggio  $N_D$  o  $N_A$

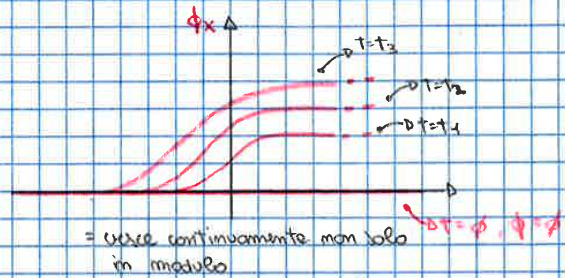


Il processo termina abbastanza velocemente!!

Le zone con carica locale tendono ad immergere un campo elettrico e sul potenziale  
eq. di Poisson



= cresce continuamente in Modulo!

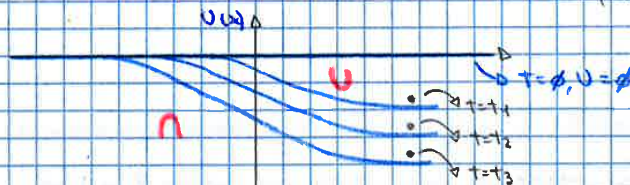


= cresce continuamente non solo in modulo

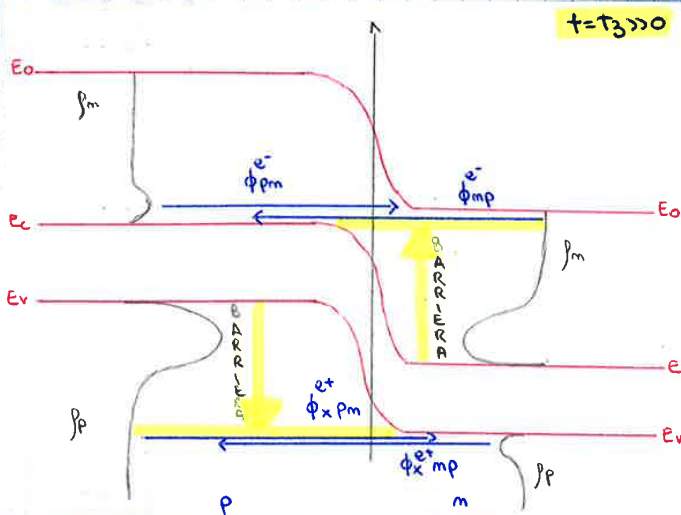
Il sistema, spostando dai portatori, immette un  $\vec{E}$  e un  $\phi$  da lui, dicendo che c'è una tensione posso dire che ci sia un'energia potenziale  $U(x)$

NB: ottenuto ribaltando  $\phi$  rispetto a x e moltiplicando per  $q$

$$V = \frac{U}{q}$$



Al tempo  $t_3$  come cambia il diagramma a bande?



La barriera, che si genera per la presenza di una differenza di potenziale e quindi di un'energia di potenziale, fa sì che vi sia una frenata nel flusso poiché non c'è energia per passare da una parte all'altra

Solo una parte di  $e^-$  ed  $e^+$  passano poiché fanno l'energia sufficiente al passaggio come se non vedessero la barriera.

Appena io ottengo  $\phi_{mp} = \phi_{pn}$  sia per  $e^-$  che per  $e^+$  a quel punto posso dire di aver raggiunto l'equilibrio termodynamico NUOVO!

$\Rightarrow$  la generazione del campo elettrico dovuto alla diffusione fa sì che il meccanismo termini fino all'equilibrio

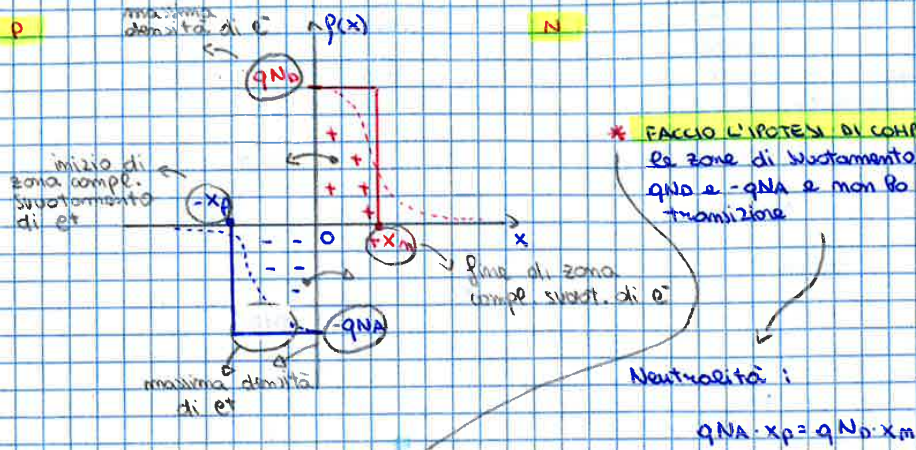
### REGOLE PER TRACCIARE IL DIAGRAMMA A BANCHE ALL'EQUILIBRIO

- 1) Il livello di Fermi  $E_F(x)$  è costante
- 2) Nei semiconduttori affinità elettronica ed energy gap non variano = costanti  
( $\chi$ ) ( $E_g$ )
- 3)  $E_0(x)$  deve essere una funzione continua
- 4) Lontano dalle interfacce il diagramma a bande viene considerato come quello del materiale "separato"  
zona di contatto
- 5) Nei metalli il diagramma a bande non cambia MAI, è approssimabile a quello del materiale "separato"

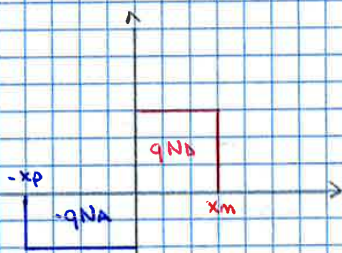
esempio:  $N_A = 10^{16}$   $N_D = 10^{17}$   $T = 300K$

$$\phi_i = \frac{0.026}{q} \cdot \log\left(\frac{10^{16} \cdot 10^{17}}{(1.65 \cdot 10^{19})^2}\right) = 0.36 \text{ eV}$$

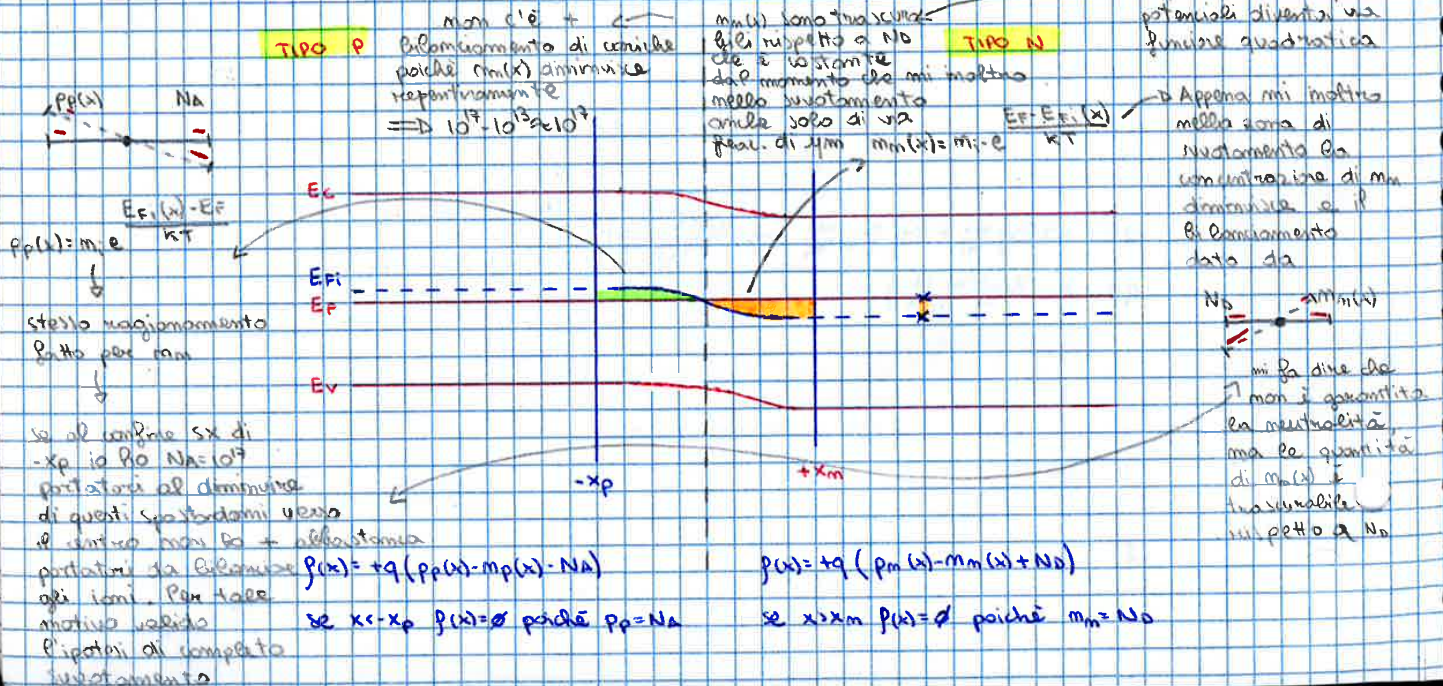
**RAGIONAMENTI SULLA ZONA DI SVUOTAMENTO**



Tale ipotesi viene fuori ed è valida per il seguente motivo:



Il diagramma a bande nella zona prossima alla giunzione è:

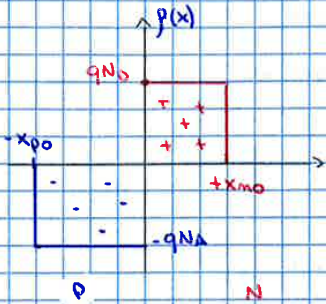


DISPOSITIVI ELETTRONICI  
LEZ. 20

11.11.16

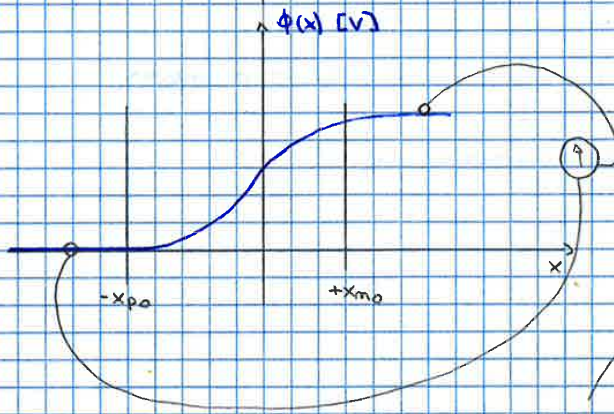
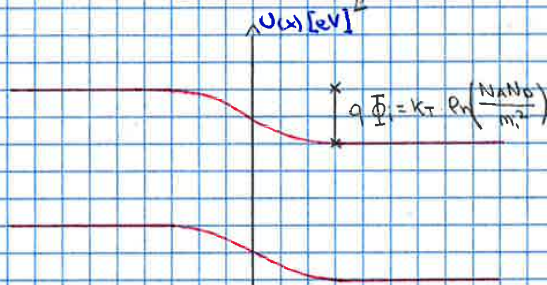
ANALISI ELETTROSTATICA DELLA GIUNZIONE ALL'EQUILIBRIO

- x<sub>po</sub> : zona svuotata lato p
  - x<sub>mo</sub> : " " " n
  - φ<sub>i</sub> : |E<sub>F</sub>-E<sub>F</sub>i|
- } 3 EQ. per 3 INCOGNITE



Equazioni utilizzabili:

- 1) Neutralità:  $-\int_{-x_{po}}^0 \rho(x) dx = \int_0^{x_{mo}} \rho(x) dx$   
 $\Rightarrow +qN_A \cdot x_{po} = qN_D \cdot x_{mo}$
- 2) Poisson:  $\phi_i = f(x_{po}, x_{mo})$
- 3) Potenziale di contatto:



Per passare dall'energia a potenziale (qφ<sub>i</sub>) al potenziale (φ<sub>i</sub>) devo ribaltare e dividere per q

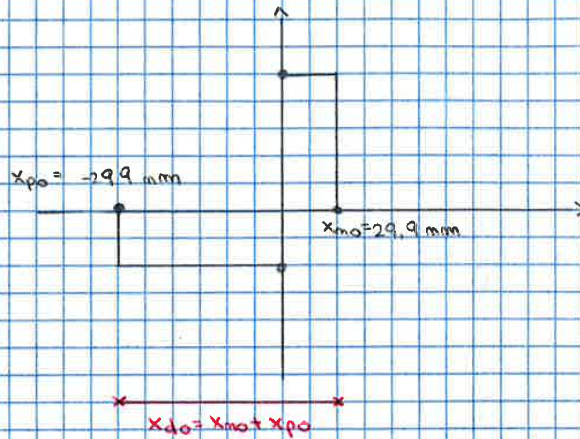
$\frac{N_A N_D}{n_i^2}$   
 $\phi_i = 0.76 \text{ V se}$   
 $N_A = 10^{16}, N_D = 10^{17}$   
 $T = 300 \text{ K}$

Potenziale di contatto:  $\frac{q\phi_{sn} - q\phi_{sp}}{-q} = \frac{-kT \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)}{-q} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) = \Phi_i$

$$x_{mo} = \sqrt{\frac{2Es}{9ND} \left( \frac{NA}{NA+ND} \right) \phi_i}$$

$$x_{po} = \frac{ND}{NA} x_{mo}$$

$$x_{po} = \frac{ND^2}{NA^2} \frac{2Es}{9ND} \left( \frac{NA}{NA+ND} \right) \phi_i = \sqrt{\frac{2Es}{9NA} \left( \frac{ND}{NA+ND} \right) \phi_i} = 10 \cdot 29,9 = 299 \text{ mm}$$



$$x_{do} = x_{mo} + x_{po} \frac{ND}{NA} = x_{mo} \left( 1 + \frac{ND}{NA} \right) = x_{mo} \left( \frac{NA+ND}{NA} \right)$$

$$x_{do} = \sqrt{\frac{2Es}{9ND} \left( \frac{NA}{NA+ND} \right) \phi_i} \cdot \frac{(NA+ND)^2}{NA^2} =$$

$$x_{do} = \sqrt{\frac{2Es}{9} \frac{NA+ND}{NA \cdot ND} \phi_i}$$

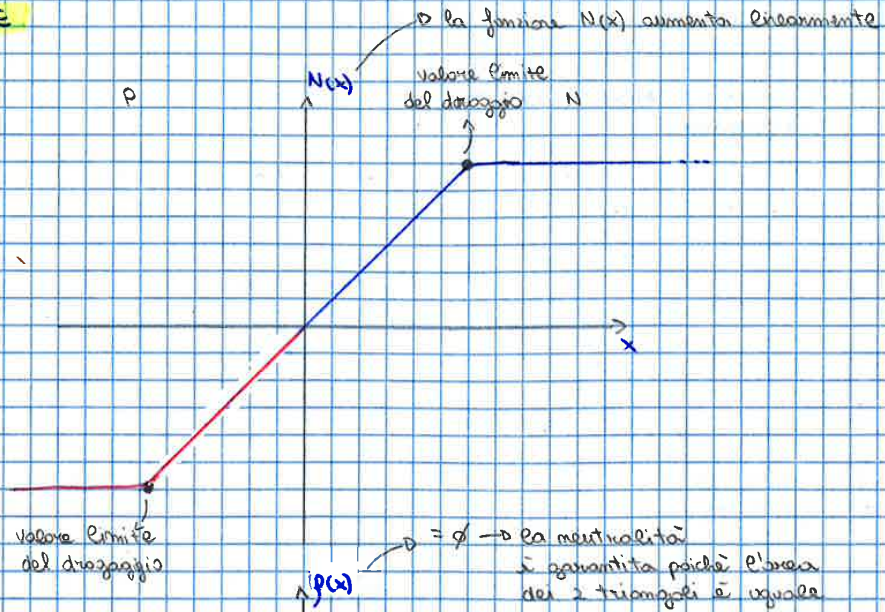
← IMPORTANTE

$$\frac{1}{\frac{1}{NA} + \frac{1}{ND}} = \frac{NA \cdot ND}{NA + ND} = N_{eq}$$

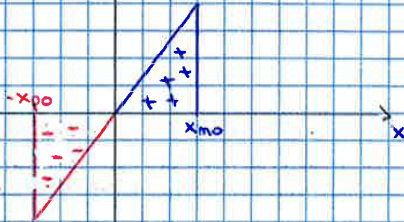
$$x_{do} = \sqrt{\frac{2Es}{9} \frac{1}{N_{eq}} \phi_i}$$



### 3 • FUNZIONE LINEARE



$$\rightarrow f(x) = q \cdot a \cdot x$$



Agendo con un voltmetro posso leggere le differenze di potenziale tra le interfacce!

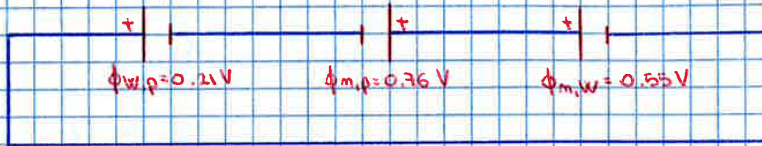
$$\phi_{m,p} = 0.36 \text{ V}$$

$$\phi_{w,p} = \frac{q\phi_n - q\phi_{sp}}{-q} = 0.21 \text{ V}$$

$$\phi_{m,w} = \frac{q\phi_{sm} - q\phi_n}{-q} = 0.55 \text{ V}$$

0 Volt perché ho appena diviso per q

→ Disegno il circuito equivalente di quel sistema



KVL alla maglia:

$$\phi_{w,p} - \phi_{m,p} + \phi_{m,w} = 0$$

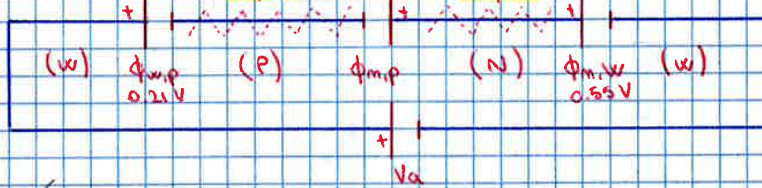
dunque questa equazione esprime il fatto che qualsiasi metallo io prenda la tensione che misuro è sempre nulla poiché la tensione di contatto  $\phi_i$  è sempre bilanciata dalle tensioni presenti tra metallo e semiconduttore

$$\phi_{w,p} + \phi_{m,w} = \phi_{m,p}$$

potenziale contatto = potenziale presente tra metallo e lato p ed n (sommati) del semiconduttore



→ Tornando al punto di partenza, applico una tensione esterna  $V_a \neq 0$  → il + verso la p per convenienza  
considero che non c'è caduta qui in metallo  $R_{mp} = 0$  così poco che non c'è caduta qui in metallo  $R_{mp} = 0$



Applicando una tensione esterna  $V_a$  fa per certo il metallo non varia il suo potenziale con il semiconduttore che resta costante!!! Tutta la differenza del potenziale  $V_a$  esterno verrà completamente assorbita dal potenziale di contatto  $\phi_i$

$$-V_a + \phi_{w,p} - V_j + \phi_{m,w} = 0$$

$$V_j = (\phi_{w,p} + \phi_{m,w}) - V_a = \phi_{m,p} - V_a$$

→  $V_a = 0$   $V_j = \phi_i = 0.36 \text{ V}$

→  $V_a < 0$   $V_j = \phi_i - V_a = \phi_i + |V_a|$

→  $V_a > 0$   $V_j = \phi_i - V_a$

grafico dall'equilibrio  
alla polarizzazione  
inversa

$E(x)$

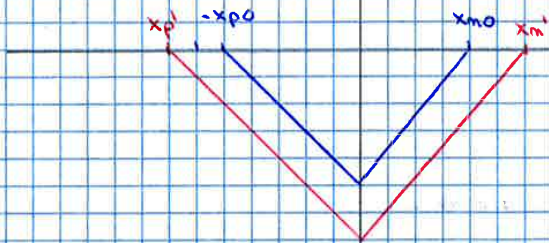
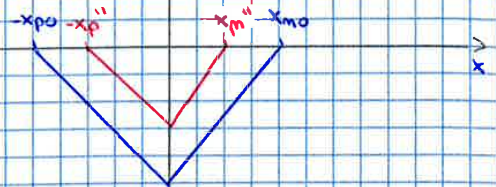
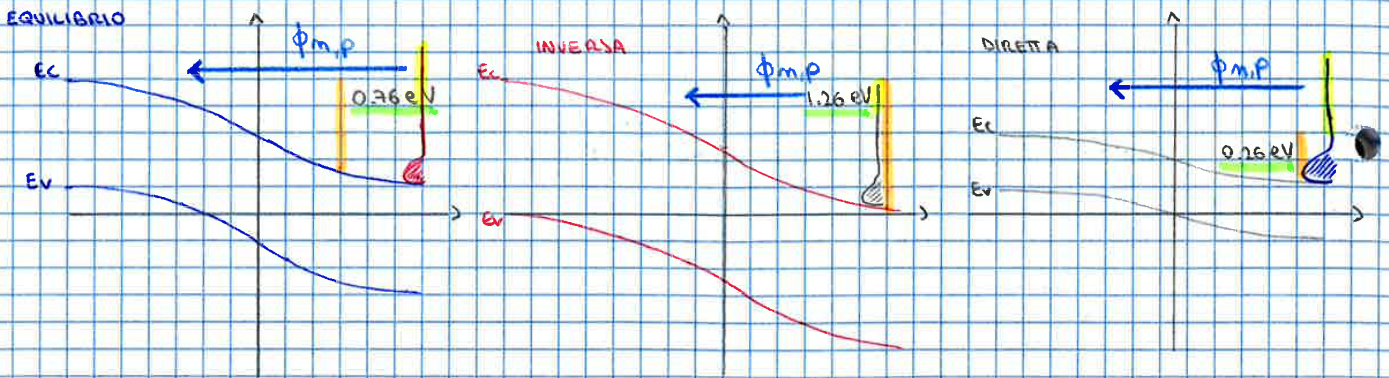


grafico dall'equilibrio  
alla polarizzazione  
diretta

$E(x)$



⇒ D Le tensioni esterne  $V_a$  modificano il sistema e vengono totalmente assorbitate dalla giunzione p-n. Variamo dunque i valori di  $f(x)$ ,  $E(x)$  e  $\phi(x)$  che risulteranno un ampliamento di zona di svuotamento ed aumento in modulo nel caso di una polarizzazione inversa ( $V_a < \phi$ ); una diminuzione del modulo di  $f(x)$ ,  $E(x)$ ,  $\phi(x)$  e della zona di svuotamento nel caso di una polarizzazione diretta ( $V_a > \phi$ )

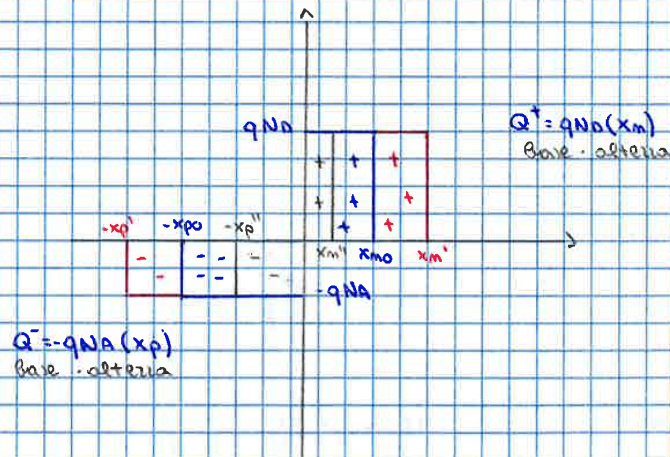


⇒ La  $V_a$  esterna influisce sul diagramma a bande aumentando o diminuendo il pot. contatto

⇒ flusso elettronico in pol. inversa è minore, in diretta è maggiore poiché + elettroni hanno en. sufficiente per il gap (vedi ev. giallo nei grafici)

### CAPACITÀ DI SVUOTAMENTO

In una giunzione se applico una tensione cambio la quantità di carica (per mantenendo la neutralità) positiva e negativa



⇒ Valida per entro e fuori equilibrio:

$$Q^- = -qNa \cdot xp(V_a)$$

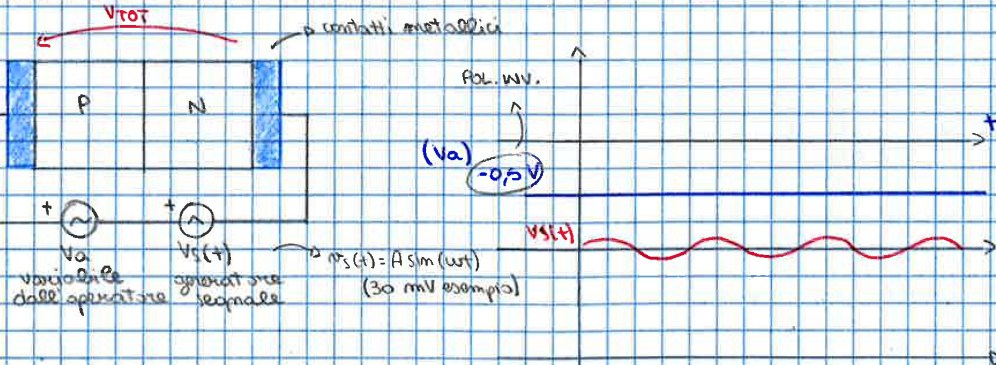
$$Q^+ = qNa \cdot xn(V_a)$$

⇓

$$\text{ma } Q^+(V_a) = -Q^-(V_a)$$

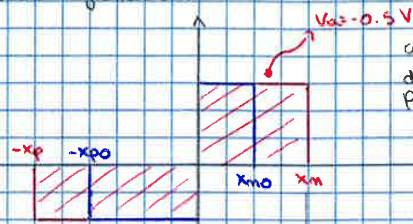
SEMPRE!!

$$C_{dep} = \frac{dQ^+(V_a)}{dV_a} = \text{CAPACITÀ DI SVUOTAMENTO}$$



Va è la tensione costante, Vs la sinusoidale

Cosa accade allora Vtot nella giunzione?



come già so la regione invertita per effetto di una tensione negativa uscite (pol. inversa). Per ora ho solo ancora Va, Vs(t) è spento

⇒ EFFETTO DI Va

Partendo con una xminda + (Vs(t)) nel tempo si riduce seguendo l'andamento del ramo.



Lo stesso per la corrente di xm

NB La neutralità va garantita

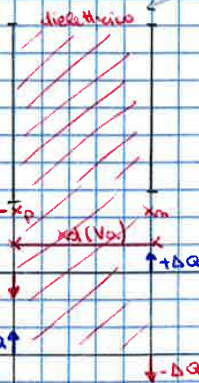
Metto due assi dei tempi che va visto come rappresentazione di ciò che fa la carica nel tempo

⇒ EFFETTO DI Vs(t) che è piccolissimo e lo immagino come un seno che varia nel tempo

induce una piccola variazione di carica nell'intorno di xm e xp

⇒ è come se avessi un condensatore di capacità xd(Va) Modulo della tensione Va una variazione di carica nell'intorno di xm e xp

Da qui si emite con un segnale infinitesimo Vs(t), quello è un condensatore a piastre piane e parallele con xd di distanza e all'intorno come dielettrico il Si svuotato



NB

in pol. inversa la regione di svot. aumenta xk aumenta il dielettrico

La cui capacità sarà:

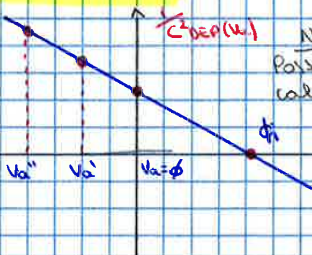
$$C_{cap} = \frac{\epsilon_s}{x_d(V_a)}$$

$$C_{cap} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{\frac{2\epsilon_s(\phi_i - V_a)}{qN_A}}}$$

$$C_{cap}(V_a) = \frac{q\epsilon_s N_A q}{\sqrt{2(\phi_i - V_a)}}$$

⇒ si vede che si torna al risultato finale già trovato

**FUNZIONE AUSILIARIA**



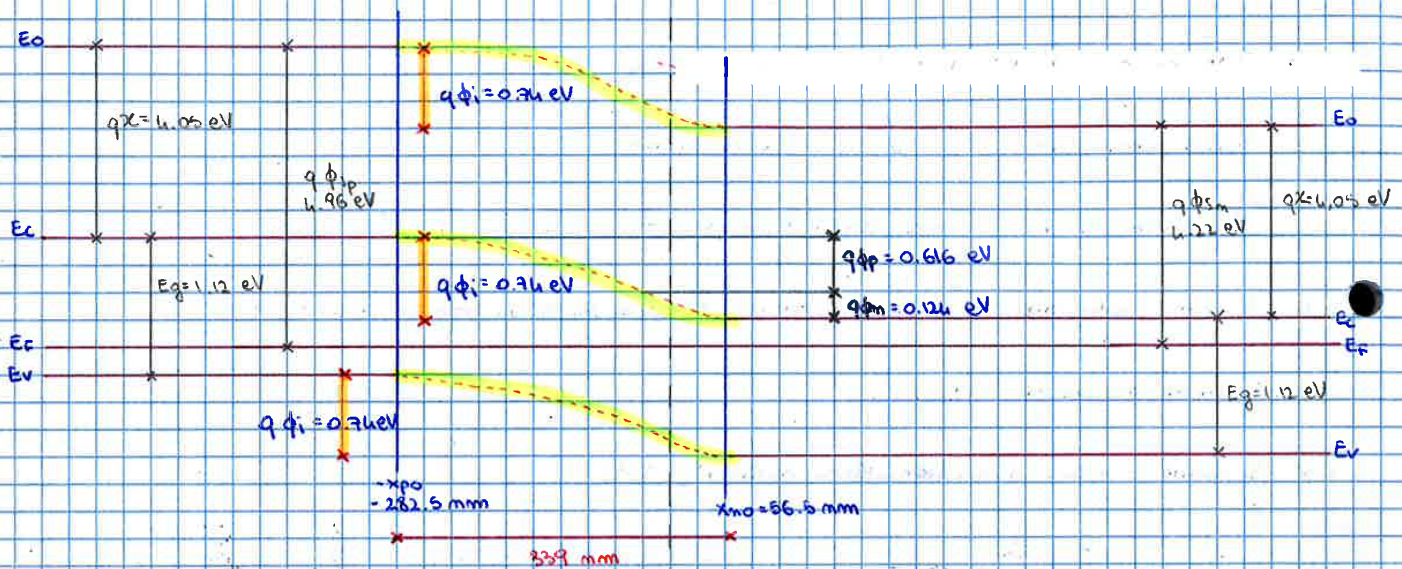
NB Poiché finalmente calcoleremo il potenziale di contatto di contatto

$$\frac{1}{C_{cap}} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{q\epsilon_s N_A q}$$

⇒ moltiplicando la C\_cap(Va) due volte con due valori diversi in pol. INVERSA, siccome per due punti passa una sola retta, la retta per quei due intersecherà l'asse delle x in corrispondenza di phi\_i

2.1) Un diagramma a bande **RETAGLIATO** deve avere tutto ciò che siamo in grado di calcolare

$N_A = 10^{16}$        $N_D = 5 \cdot 10^{16}$   
 5 volte  
 perciò tutto una zona  
 spostata in p 5 volte  
 quella in n



$$q\phi_{sp} = q\chi + \frac{E_g}{2} + kT \log \frac{N_A}{n_i} = 4.05 + 0.56 + 0.026 \cdot \log \frac{10^{16}}{1.45 \cdot 10^5} = 4.96$$

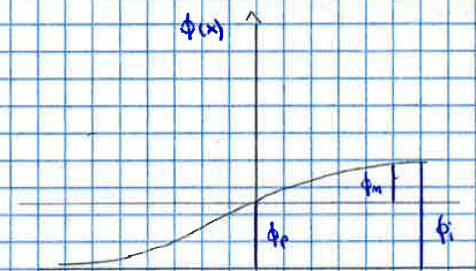
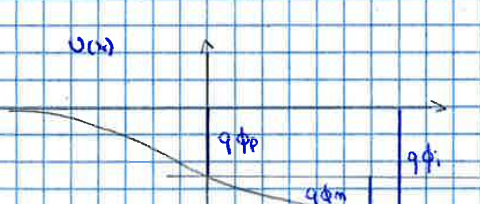
$$q\phi_{sm} = q\chi + \frac{E_g}{2} - kT \log \frac{N_D}{n_i} = 4.05 + 0.56 + 0.026 \log \frac{5 \cdot 10^{16}}{1.45 \cdot 10^5} = 4.22$$

$$q\phi_i = q\phi_{sp} - q\phi_{sm} = 0.74$$

NB: ora anche calcolabile con  $q\phi_i = -kT \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$

$x_{do} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_D q \phi_i}} = 339 \text{ mm}$        $x_{no} = \frac{N_A}{N_A + N_D} x_{do} = 56.5 \text{ mm}$        $x_{p0} = \frac{N_D}{N_A + N_D} x_{do} = 282.5 \text{ mm}$        $N_{eq} = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} = \frac{5 \cdot 10^{32}}{6 \cdot 10^6} = 8.3 \cdot 10^5$

$1.6 \cdot 10^{-19}$        $11.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}$        $0.74 \text{ V}$



$$\phi_p = \frac{q N_A}{2\epsilon_s} x_{p0}^2 \quad \phi_m = \frac{q N_D}{2\epsilon_s} x_{no}^2 \quad \frac{\phi_p}{\phi_m} = 5 \quad \phi_p = \frac{5}{6} \phi_i = 0.616 \text{ V} \quad \phi_m = \frac{1}{6} \phi_i = 0.124 \text{ V}$$

2.4) Valore della capacità di svuotamento per  $V_a = 0$  e per  $V_a = -2.22$  V

$$C_{DEP}(0)$$

$$C_{DEP}(V_a')$$

$$C_{DEP}(V_a) = A_j \cdot \frac{q \epsilon_s N_{eq}}{\sqrt{2(\phi_i - V_a)}}$$

da cui

$$C_{DEP}(0) = A_j \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_{eq}}{2 \phi_i}}$$

$$C_{DEP}(-2.22) = A_j \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_{eq}}{2(\phi_i + 2.22)}}$$

oppure.....

$$C_{DEP}(0) = A_j \cdot \frac{\epsilon_s}{x_{do}}$$

$$C_{DEP}(V_a') = A_j \frac{\epsilon_s}{x_d(V_a')} = A_j \cdot \frac{\epsilon_s}{2x_{do}}$$

$$= \frac{C_{DEP}(0)}{2}$$

ricordando che il comportamento è quello del condensatore

NB:  $C_{DEP}(V_a) = \frac{q \epsilon_s N_{eq}}{\sqrt{2(\phi_i - V_a)}}$  da una capacità per unità di superficie (F/cm<sup>2</sup>)

→ dunque moltiplico per l'area totale ottenendo così la sola capacità in F

$$\Rightarrow C_{DEP}(0) = A_j \cdot \frac{\epsilon_s}{x_{do}} = 10^{-2} \cdot \frac{11.7 \cdot 8.854 \cdot 10^{-14}}{339 \cdot 10^{-9}} = 3.05 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_{DEP}(V_a') = \frac{3.05 \cdot 10^{-10}}{2} = 1.53 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

2.7)  $N_A' = 2N_A$      $N_D' = 2N_D$      $N_{eq}' = 2N_{eq}$

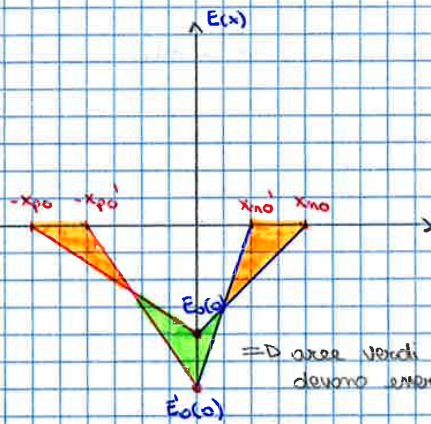
$$\phi_i' = \frac{kT}{q} \log \frac{N_A N_D'}{(m_i)^2} = \frac{kT}{q} \log \frac{4N_A N_D}{(m_i)^2} = \phi_i + \frac{kT}{q} \log(4) = 0.34 + 0.026 \log 4$$

36 mV

⇒ Poiché avendo raddoppiato i drogaggi  $\phi_i$  varia molto poco. Poco + del 5 per cento

$$x_{do}' = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_i'}{q N_{eq}'}} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_i}{q N_{eq} \cdot 2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s \phi_i}{q N_{eq}}} = \frac{x_{do}}{\sqrt{2}} = 240 \text{ nm}$$

⇒ riduzione notevolmente della zona di svuotamento all'anodo del drogaggio

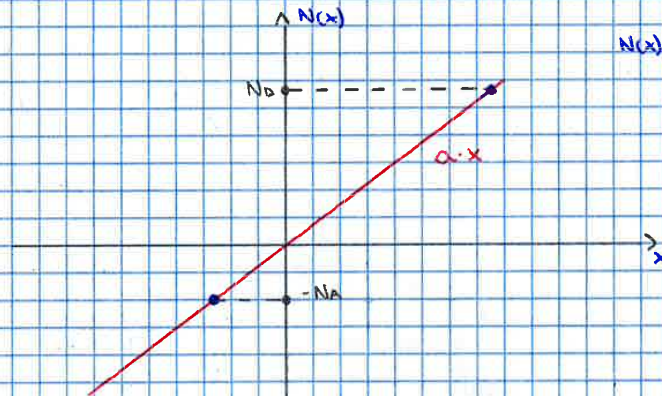


diminuisce la zona di svuotamento (zona d) e quindi aumenta la capacità  $C = \frac{d\phi}{dx}$

⇒ aumentare il drogaggio fa aumentare il campo alla giunzione perché le due aree devono restare uguali!!!

⇒ aree verdi e arancio devono essere uguali →  $\phi(x)$  resta costante

2.8



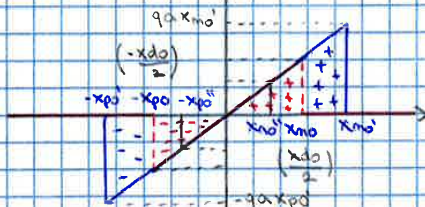
$$N(x) = N_D(x) - N_A(x)$$

2.8.1) Valore di  $\alpha$  tale che  $\phi_i$  sia uguale al punto  $\rightarrow$

$$\phi_i = 0.34 \text{ V}$$

↑  $\phi(x)$

$f(x) = \pm q \cdot \alpha \cdot x$  (oltre la zona di svuot.  $f(x) = \phi$  per la neutralità)



- Equilibrio
- pol. inversa
- pol. diretta



Da cui, all'equilibrio:

$$\textcircled{1} \quad \phi_i = \frac{q \cdot a}{n \epsilon_s} x_{do}^3 = V_T$$

Avendo già assunto (usato) la neutralità e Poisson non mi resta che usare il potenziale di contatto:

$$\phi_i = \frac{kT}{q} \log \frac{N_A N_D}{(n_i)^2} = V_T \log \frac{N_A(-x_{po}) N_D(x_{no})}{(n_i)^2}$$

$$\phi_i = V_T \log \frac{N_A(x_{po}) \cdot N_D(x_{no})}{(n_i)^2}$$

$$\phi_i = V_T \log \left( \frac{(a \cdot x_{do}/2)^2}{(n_i)^2} \right)$$

$$\phi_i = 2 V_T \log \frac{a \cdot x_{do}/2}{n_i}$$

$$\textcircled{2} \quad \phi_i = 2 V_T \log \frac{a x_{do}}{2 n_i}$$

Dalla  $\textcircled{2}$  ricavo  $x_{do}$ :

$$e^{\frac{\phi_i}{2 V_T}} = \frac{a x_{do}}{2 n_i}$$

$$x_{do} = \frac{2 n_i}{a} e^{\frac{\phi_i}{2 V_T}}$$

che metto nella  $\textcircled{1}$ :

$$\phi_i = \frac{q \cdot a}{n \epsilon_s} \left( \frac{2 n_i}{a} e^{\frac{\phi_i}{2 V_T}} \right)^3$$

$$\phi_i = \frac{q \cdot a}{3 n \epsilon_s} \frac{8 n_i^3}{a^3} \cdot e^{\frac{3 \phi_i}{2 V_T}}$$

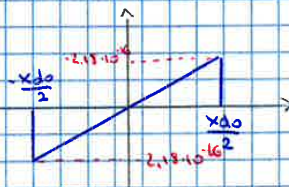
$$\phi_i = \frac{2 q n_i^3}{3 \epsilon_s a^2} \cdot e^{\frac{3 \phi_i}{2 V_T}}$$

Da cui a:

$$a = \left( \frac{2}{3} \frac{q n_i^3}{\epsilon_s \phi_i} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{3 \phi_i}{4 V_T}}$$

$$a = \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{19}}{11,7 \cdot 8,854 \cdot 10^{-14}} \cdot \frac{(10^{-6} \cdot 1,45)^3}{0,74} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{3 \cdot 0,74}{4 \cdot 0,026}} = 1,21 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-4}$$

che mi dà un  $x_{do} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$



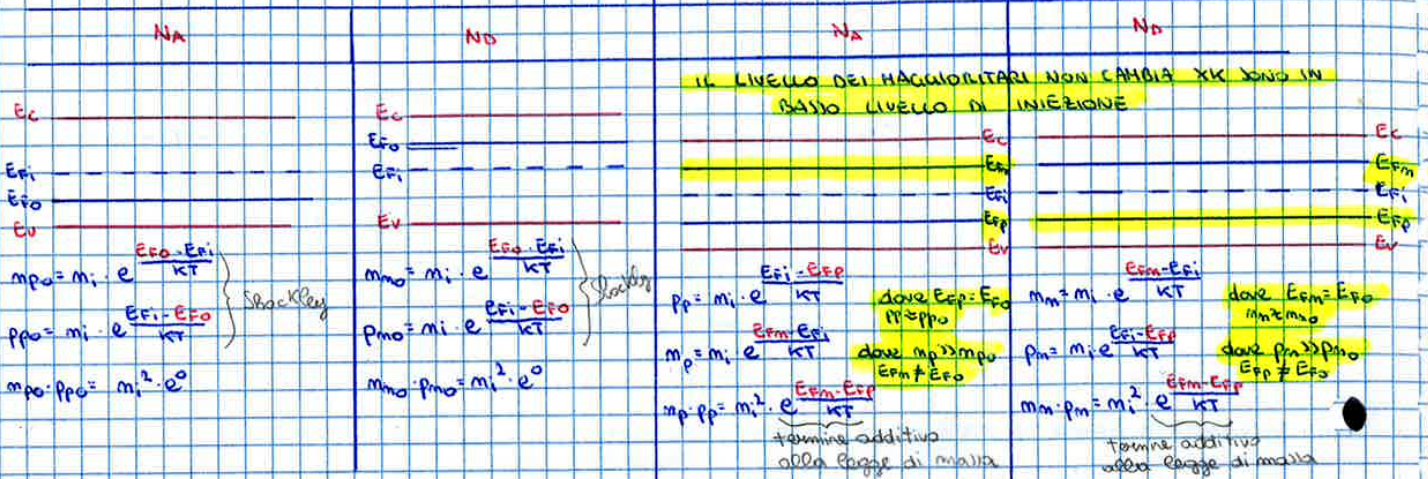
**DIPOSITIVI ELETTRONICI**  
**LEZ. 25**

24.11.2014

**QUASI LIVELLI DI FERMI** → Livelli strumentali da usare nell'eq. di Shockley per avere le concentrazioni

**EQUILIBRIO**

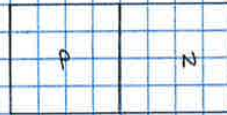
**NON EQUILIBRIO (Basso livello di iniezione)**



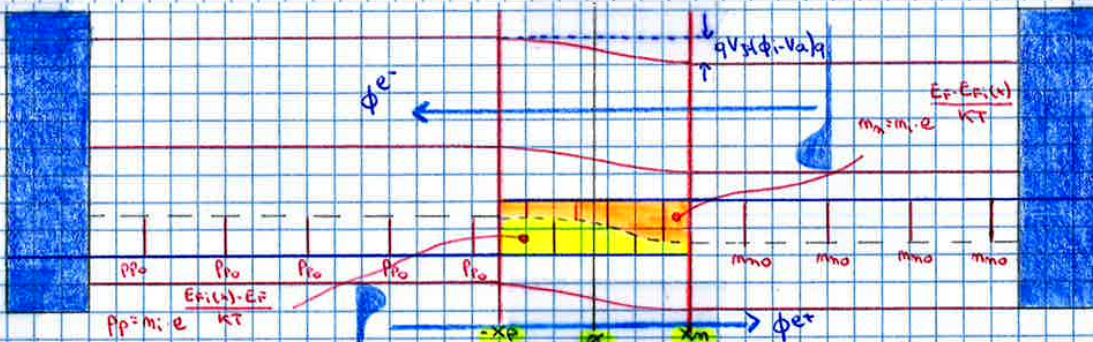
⇒ SDOPPIAMENTO DEL LIVELLO DI FERMI ALL'EQUILIBRIO

⇒ le equazioni di Shockley sono opportunamente utilizzabili utilizzando i Quasi Livelli di Fermi!! Si modifica dunque la legge dell'azione di massa!

**APPLICAZIONE ALLA GIUNZIONE**



Polarizzo direttamente:  $V_a = 0.5 V$



Prolungando il livello di Fermi del lato p fino a  $x_n$  e facendo lo stesso per il lato n fino a  $x_p$ , ottenendo così i quasi livelli di Fermi, trovo che distante dalla zona di svuotamento i portatori non risentono dell'effetto della tensione e sono quelli dell'equilibrio ( $n_{n0}$  e  $p_{p0}$ )

Entrando nella zona di svuotamento le concentrazioni diminuiscono come si vede dalle zone colorate. All'interno della zona di svuotamento mi trovo due livelli di Fermi e la loro differenza sarà esattamente la tensione applicata  $V_a$ . Dunque all'interno dello svuotamento non avrò più  $n_i^2$  ma  $e^{-}$  ed  $e^{+}$  variano come la differenza dell'esponenziale dei livelli di Fermi all'equilibrio, dunque  $e^{-}$

DISPOSITIVI ELETTRONICI  
LEZ. 26

25.11.2014

LEGGI DELLA GIUNZIONE

1)  $m_p(-x_p) = m_{p0} = e \cdot \frac{E_{fp} - E_{fi}(-x_p)}{kT} \cdot n_i$

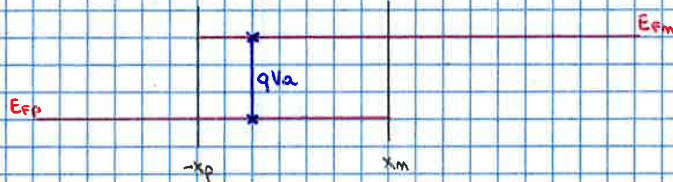
2)  $p_n(x_n) = p_{n0} = n_i \cdot e \cdot \frac{E_{fi}(x_n) - E_{fn}}{kT}$

3)  $m_p(-x_p) = n_i \cdot e \cdot \frac{E_{fn} - E_{fi}(-x_p)}{kT}$

4)  $p_n(x_n) = n_i \cdot e \cdot \frac{E_{fi}(x_n) - E_{fp}}{kT}$

Dalla ① :  $n_i = m_{p0} \cdot e \cdot \frac{E_{fi}(-x_p) - E_{fp}}{kT}$  che mette in ③ :  $m_p(-x_p) = m_{p0} \cdot e \cdot \frac{E_{fn} - E_{fp}}{kT}$

Dalla ② :  $n_i = p_{n0} \cdot e \cdot \frac{E_{fn} - E_{fi}(x_n)}{kT}$  che mette in ④ :  $p_n(x_n) = p_{n0} \cdot e \cdot \frac{E_{fn} - E_{fp}}{kT}$



1ª  $m_p(-x_p) = m_{p0} \cdot e \cdot \frac{V_a}{V_T}$   
 $m_p'(-x_p) = m_p(-x_p) - m_{p0} = m_{p0} \cdot (e^{\frac{V_a}{V_T}} - 1) = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot (e^{\frac{V_a}{V_T}} - 1)$

2ª  $p_n(x_n) = p_{n0} \cdot e^{\frac{V_a}{V_T}}$   
 $p_n'(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0} = p_{n0} \cdot (e^{\frac{V_a}{V_T}} - 1) = \frac{n_i^2}{N_D} \cdot (e^{\frac{V_a}{V_T}} - 1)$

$$\phi = \frac{1}{q} \frac{d}{dx} \left( q D_m \frac{dm_p}{dx} \right) - \frac{m_p}{\Sigma_m}$$

$$\phi = D_m \frac{d^2 m_p}{dx^2} - \frac{m_p}{\Sigma_m}$$

$$\frac{d^2 m_p}{dx^2} = \frac{m_p}{\Sigma_m D_m}$$

$$L_m = \sqrt{D_m \Sigma_m} \quad \text{con } W_p \gg L_m \quad \text{MODO LUNGO}$$

$$m_p(x) = A \cdot e^{+x/L_m} + B \cdot e^{-x/L_m}$$

$$\frac{m_p(x)}{x \rightarrow -\infty} \approx 0 \quad \text{COND. ESTREMI}$$

$m_p(x_p) = \text{NOTO}$  COND. CONTORNO!  
 $L_p$  per la legge della giunta.

$$m_p(-x_p) = A \cdot e^{-x_p/L_m}$$

$$A = m_p(-x_p) \cdot e^{x_p/L_m}$$

$$m_p(x) = m_p(-x_p) \cdot e^{x_p/L_m} \cdot e^{-x/L_m}$$

$$m_p(x) = m_p(-x_p) \cdot e^{\frac{x+x_p}{L_m}}$$

ma  $m_p(-x_p) = \frac{m_i^2}{N_a} (e^{V_a/V_T} - 1)$

$$m_p(x) = \frac{m_i^2}{N_a} (e^{V_a/V_T} - 1) \cdot e^{\frac{x+x_p}{L_m}}$$

$$\phi = -\frac{1}{q} \frac{d}{dx} \left( -q D_p \frac{dp_m}{dx} \right) - \frac{p_m}{\Sigma_p}$$

$$\phi = D_p \frac{d^2 p_m}{dx^2} - \frac{p_m}{\Sigma_p}$$

$$\frac{d^2 p_m}{dx^2} = \frac{p_m}{\Sigma_p D_p}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \Sigma_p} \quad \text{con } W_m \gg L_p \quad \text{MODO LUNGO}$$

$$p_m(x) = C \cdot e^{+x/L_p} + D \cdot e^{-x/L_p}$$

$$\frac{p_m(x)}{x \rightarrow +\infty} \approx 0 \quad \text{COND. ESTREMI}$$

$p_m(x_m) = \text{NOTO}$  COND. CONTORNO!  
 $L_p$  per la legge della giunzione.

$$p_m(x_m) = D \cdot e^{-x_m/L_p}$$

$$D = p_m(x_m) \cdot e^{x_m/L_p}$$

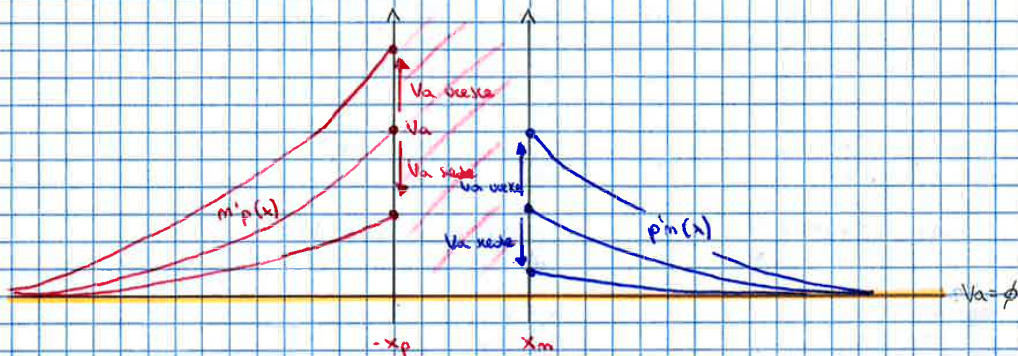
$$p_m(x) = p_m(x_m) \cdot e^{x_m/L_p} \cdot e^{-x/L_p}$$

$$p_m(x) = p_m(x_m) \cdot e^{-\frac{x-x_m}{L_p}}$$

ma  $p_m(x_m) = \frac{m_i^2}{N_a} (e^{V_a/V_T} - 1)$

$$p_m(x) = \frac{m_i^2}{N_a} (e^{V_a/V_T} - 1) \cdot e^{-\frac{x-x_m}{L_p}}$$

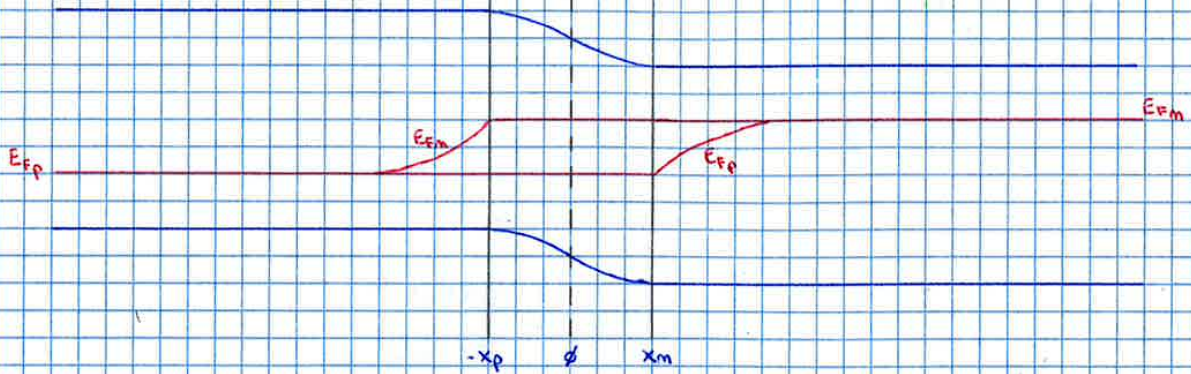
NB  
 equazioni per conoscere  
 l'effetto di partizioni  
 al variazione di  $V_a$  del  
 drogaggio e di  $x$  (chiedi)



DISPOSITIVI ELETTRONICI  
LEZ. 23

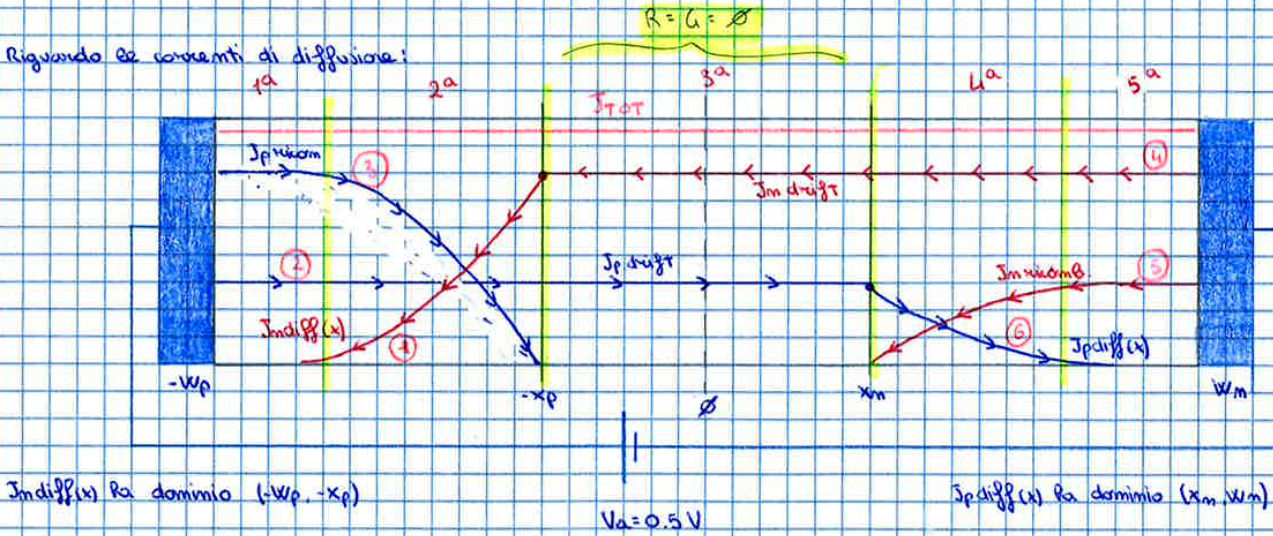
29-11-2014

CORRENTI NELLA GIUNZIONE



Che fine fanno i quasi livelli di Fermi? Essi derivano dai portatori maggioritari lontano dalla giunzione. Le concentrazioni tornano ad essere quelle dell'equilibrio dunque lontano dalla giunzione il livello di Fermi sarà quello dell'equilibrio. Nella zona prossima alla giunzione i livelli di Fermi i livelli di  $e^-$  ed  $e^+$  dovranno essere distinti, dunque avrà una piega nel lato p di  $E_{Fm}$  e in n di  $E_{Fp}$ .

=> Dopo alcune lunghezze di diffusione il quasi livello di Fermi tende ad allinearsi al quasi livello di Fermi dei maggioritari di quel lato che lontano dalla giunzione sono costanti e coincidono con quelli dell'equilibrio.



Vedendo questo grafico solo con  $J_{ndiff}(x)$  e  $J_{pdiff}(x)$  sembra incompleto poiché a dx e a x la J è nulla e ciò non è verosimile.

Egli è che attraversano p arrivando da n lo sostengo che giungono dal lato n sostenendo l'iniezione data. Questo va bene nella zona di svuotamento. Ma allora? Per spostare e dal lato n al lato p basterà applicare un campo elettrico E che abbiamo supposto influente per i minoritari, ma per i maggioritari basta un piccolo campo e ne sposta un'infinita.

Discorso perfettamente duale per la lacuna  $e^+$

Tale campo sarà positivo perché sposterà  $e^-$  verso dx ed  $e^+$  verso dx.

MA ---

I valori della corrente sono diversi! In qualsiasi sezione di un semi conduttore la corrente deve essere COSTANTE, per conservazione della carica! Se così non fosse non rispetterebbe l'eq. di continuità.

NP  
 Zona sospesa } che nella zona sparsa non succede nulla (correnti costanti) l'avevo già detto di quando costanti  
 in tale zona i quasi livelli di Fermi. Per ora la considero una zona sospesa dove chi entra non  
 subisce nessun tipo di disturbo, dunque non è intaccato e inalterato

$$R = G = \phi$$

ricombinazione e generazione sono sospesi

come calcolo in generale la corrente totale?

Posso sommare componente per componente tanto ma è costante ovunque come detto prima

Nella zona di mutamento il calcolo risulta evidentemente più facile perché ho solo 2 correnti costanti per di più di drift

Esse non sono altro che le due correnti di diffusione valutate in  $-x_p$  e in  $x_n$

Sommate  $I_0$   $I_{TOT}$  nella giunzione!

$$I_{TOT} = I_{n,diff}(-x_p) + I_{p,diff}(x_n)$$

$$I_{TOT} = \frac{q D_n \cdot n_i^2}{N_A \cdot L_n} (e^{V_A/V_T} - 1) + \frac{q D_p \cdot n_i^2}{N_D \cdot L_p} (e^{V_A/V_T} - 1)$$

$$I_{TOT} = I_{TOT, Aumentazione} = q n_i^2 A_G \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \cdot (e^{V_A/V_T} - 1)$$

EQUAZIONE DEL DIODO IDEALE

$\hookrightarrow$  è una corrente in funzione di  $V_A$

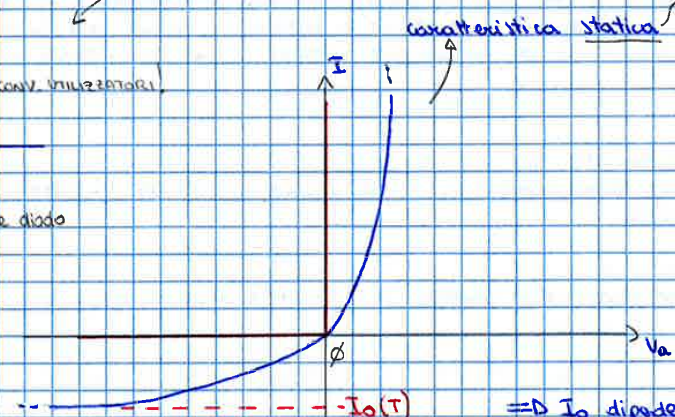
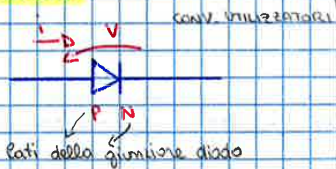
caso Emite: •  $V_A = \phi$   $I_{TOT} = \phi$

•  $q n_i^2 A_G \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$  è una costante derivante da parametri costruttivi della realizzazione della giunzione, che è detta "corrente inversa di saturazione" quando applico

tensioni negative, dunque polarizzo inversamente

$$I_{TOT}(V_A) = I_0 (e^{V_A/V_T} - 1)$$

**DIODO IDEALE**



caratteristica statica

Il diodo è in condizioni stazionarie, ossia con diodo a regime

ROSSO: caratteristica diodo ideale per cui ho un corto o un circuito aperto

BLU: caratteristica diodo reale

$\Rightarrow I_0$  dipende molto dalla temperatura poiché  $I_0$  dipende da  $n_i^2$ .

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

ASPETTO NEGATIVO

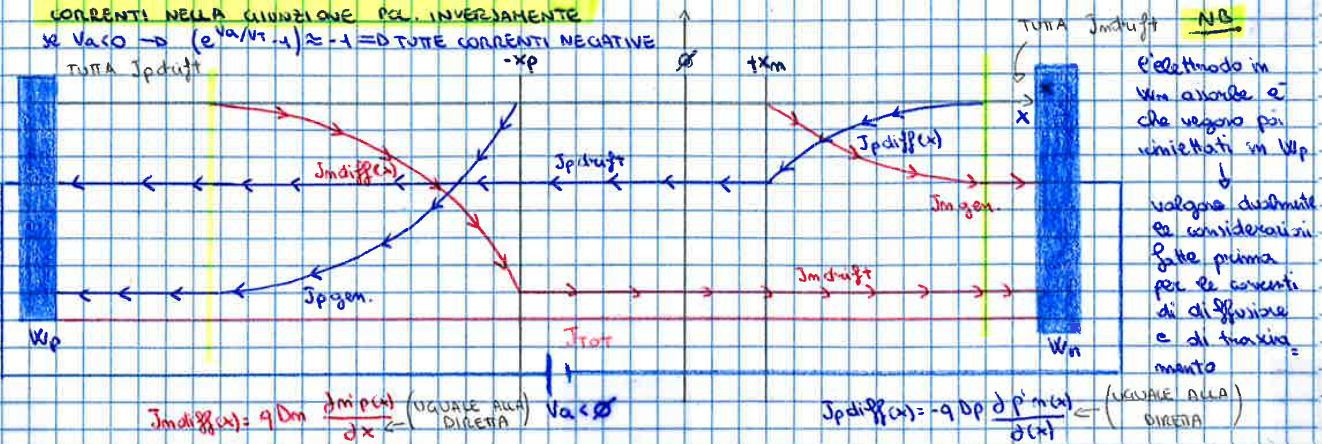
Infatti sia per pol. dirette che inverse, come vedo dal grafico, ho una approssimazione non precisa del diodo reale attraverso l'ideale. Ma soprattutto in pol. inversa ho una perdita  $I_0$  dovuta rispetto all'ideale e che dipende da  $T$

**APPUNTI ELETTRONICI**  
**LEZ. 23**

1-12-14

**CORRENTI NELLA GIUNZIONE PCL. INVERSA**

se  $V_a < 0 \rightarrow (e^{V_a/V_T} - 1) \approx -1 \Rightarrow$  TUTE CORRENTI NEGATIVE



Correnti tutte negative poiché  $V_a < 0$ !!

Le correnti  $J_{ndiff}$  e  $J_{pdiff}$  da che erano correnti di diffusione, diventano correnti di trascinamento nel momento in cui tocchiamo la giunzione (zona della voce nostra).

Dunque: la corrente totale la calcolo come somma delle componenti in ogni zona, che, se la polarizzazione diretta me la risultava positiva, ora è negativa.

Manca ciò che fa tornare i conti; ossia quella che PRIMA erano correnti di ricombinazione, ma che ORA non lo sono più!

Ora sono correnti di generazione, non di ricombinazione! Ma cosa vuol dire?

Lo spiego: in condizioni staz. vedo che  $e^-$  in p ed  $e^-$  in n cadono nella regione di svuotamento sotto forma di un flusso. Dunque quelle due correnti sono due correnti di  $e^-$  ed  $e^-$  che vanno eliminate poiché in eccesso per effetto della generazione termica.

SIGNIFICATO FINCO DELLE CORRENTI DI GENERAZIONE

La generazione termica genera coppie elettrone-lacuna.

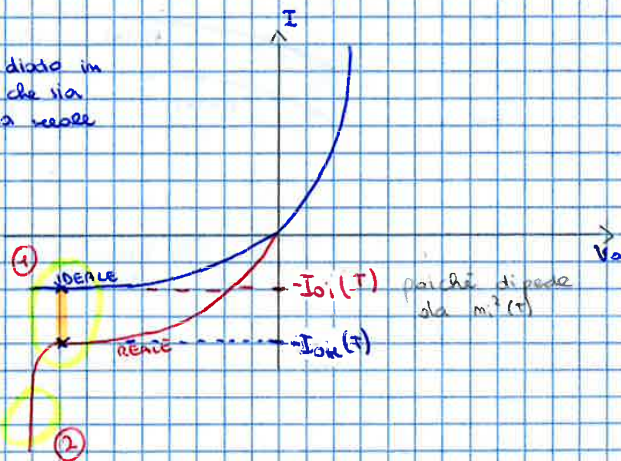
È come se generassi tali coppie vicino alla giunzione, dunque se togliessi gli elettroni da verso verso n devo togliere le lacune, altrimenti me avrei un eccesso infinito!

Non mi resta che toglierle via in modo da garantire la ricombinazione

CORRENTI DI GENERAZIONE

$\Rightarrow$  La corrente totale risulta costante esattamente come prima!

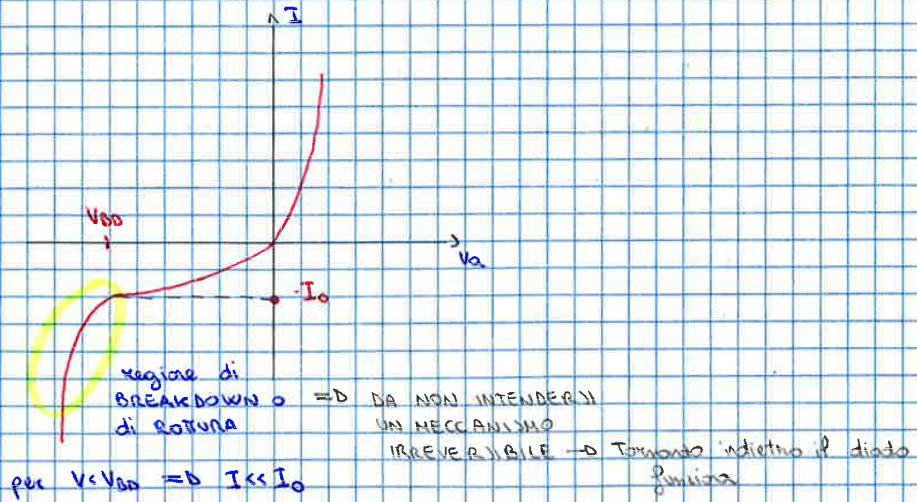
caratteristica del diodo in pol. inversa, sia che sia ideale (blu) che sia reale (rosso)



**SAPERRE!**  
NB: Nell'intervallo dei 300K  $I_0$  raddoppia ogni 10K per un diodo in Si

$I_0$  reale  $\gg I_0$  ideale

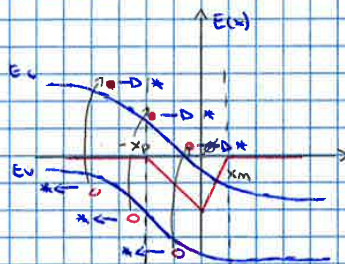
2



Il Breakdown può avvenire per: DECIDE IL LATO MENO DROGATO

VALANGA:

diagramma a Poche della Valanga



Il meccanismo a valanga fa come causa scatenante la generazione termica vista prima. Se la tensione  $V_a$  inversa è sufficientemente grande il campo  $E(x)$  imprime una forza tale ad  $e^-$  ed  $h^+$  generate tali che li fa sbattere con il reticolo.

L'urto crea una nuova coppia elettrone-lacuna, che subiscono una forza tale da sbattere e creare una nuova coppia elettrone-lacuna.

$\rightarrow$  URTO GENERATIVO!

Da un  $h^+$  si creano un successione

ecco che meccanismo a valanga!

È ovvio che il meccanismo generativo si crea dopo un certo valore minimo di  $V_a$  inversa!

$\rightarrow$  IL DROGGAGGIO DECIDE IL MECCANISMO DI ROTTURA ( $N_A$  e  $N_D$ ) per valanga se il lato meno drogato ha drogaggio non superiore a  $10^{17}$

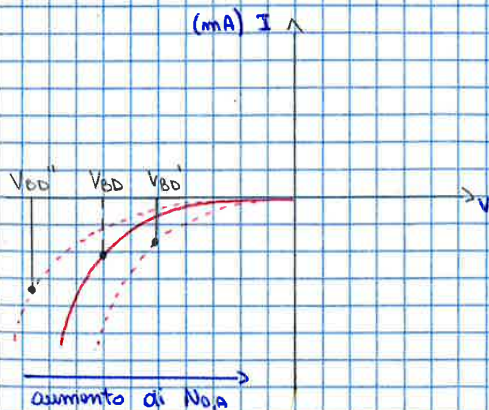
$$\min\{N_A, N_D\} < 10^{17}$$

= Disegna la caratteristica per sole tensioni negative

Poiché  $I$  è in mA non vedo più bene  $I_0$  (approssimo a 0)

Aumentando il drogaggio, aumenta il campo elettrico (vedi 2) e la tensione  $V_{BD}$  diventa più piccola

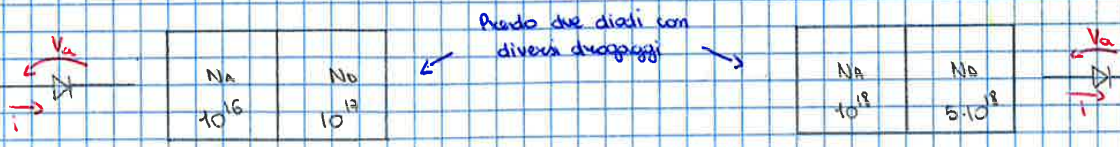
$\Rightarrow$  DROGGAGGIO E  $V_{BD}$  SONO INV. PROPORZIONALI





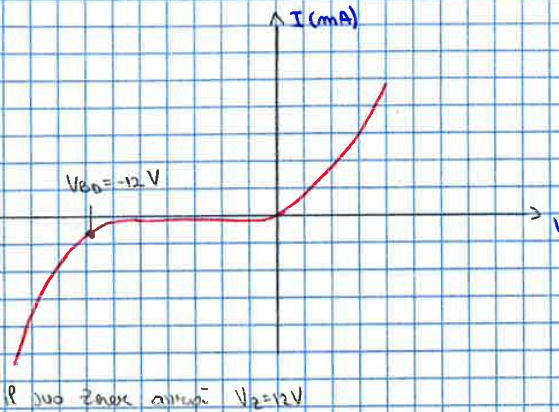
**DIODO ZENER**

Quando un diodo viene VOLUTAMENTE usato in regione di breakdown è chiamato Zener. 4 tipi di rottura

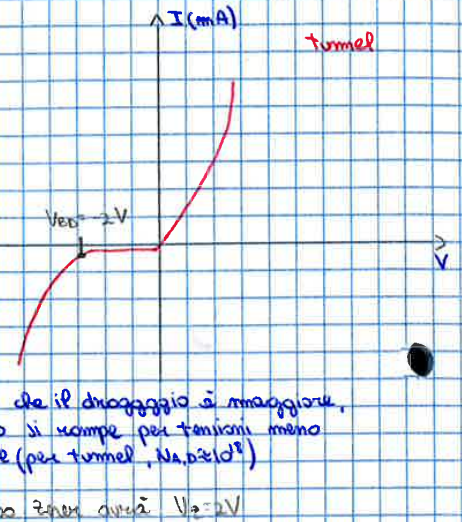


Ne misuro la caratteristica I-V

avalanga



tunnel



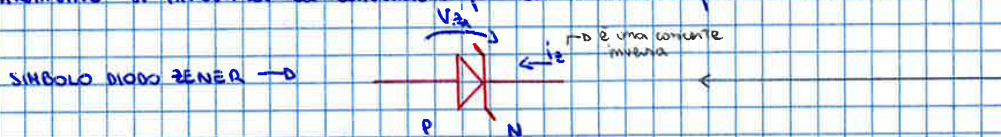
Posso usare queste giunzioni per creare lo Zener:

Avrò sia tensioni che correnti negative affinché stia in breakdown. Il che è scomodo

Perché?

Dico che quello non è + un diodo, ma è un diodo Zener!! (= convenzione per l'uso)

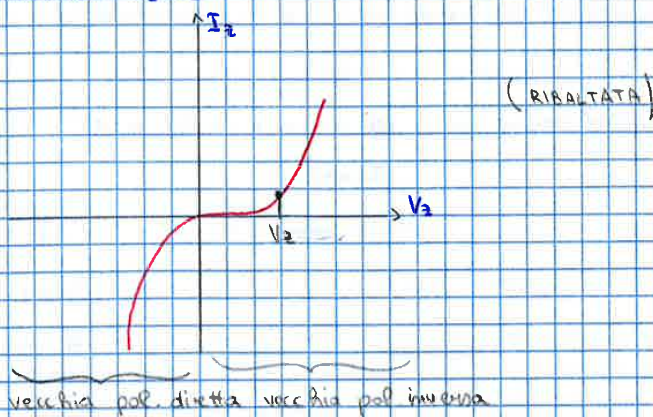
Conseguentemente si inverte la convenzione per la tensione e per la corrente



Come si vede dal disegno la corrente è presa entrante in n (nel normale è in p) e la tensione è entrante in p (nel normale è in n).

Pertanto così non tendo negativa né la tensione  $V_Z$  né la corrente  $I_Z$

Cambia dunque la caratteristica  $I_Z - V_Z$



Adunque definiamo  $V_y$  tale che mi garantisca una corrente minima ( $I_{MIN}$ )  
 tale da farmi essere ON il diodo

$$I_{MIN} = I_0 (e^{V_y/V_T} - 1)$$

-1 è inutile perché  $V_y$  è di centinaia di mV

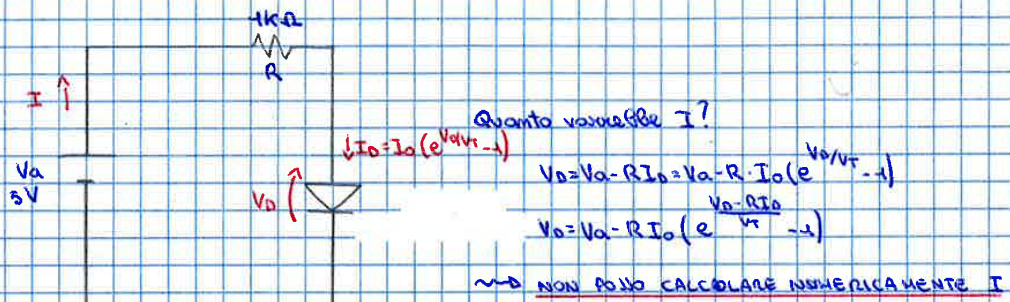
$\approx \text{mA} \gg I_0$  che è in mA

$$I_{MIN} = I_0 \cdot e^{V_y/V_T}$$

$$V_y = V_T \cdot \log\left(\frac{I_{MIN}}{I_0}\right)$$

$\Rightarrow$  se  $I_0(T)$  anche  $V_y(T)$

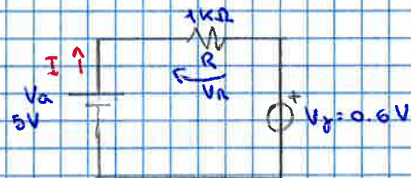
NB:  $V_y$  diminuisce di circa 2 mV per ogni grado nell'intervallo di 300 K



**ECCE COME FARE:**

Supponendo di avere il diodo ON:

Sostituisco il diodo con un gen. tensione da circa 0.6 V =  $V_y$



$$V_R = V_a - V_y = 4.4 \text{ V}$$

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{4.4}{1 \cdot 10^3} = 4.4 \text{ mA}$$