

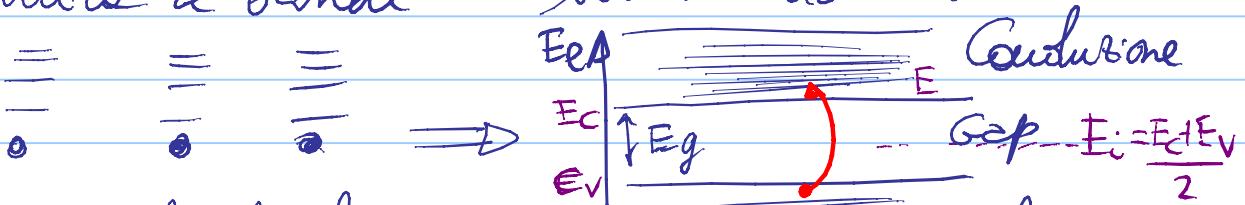
3. Semiconduttori

Titolo nota

2/19/2008

Testo: Muller-Kamins - Integrated devices electronics

1. Struttura a bande nei solidi cristallini



Valenze: livelli legati agli atomi nel reticollo cristallino - monocristallo

Condusione: livelli in cui gli elettroni sono liberi di muoversi

Band gap: zone separate, senza livelli.

- Conduttori: banda di cond. parzialmente piena

- Isolenti: banda di valenze piene $Eg \gg kT$

- Semiconduttori: banda di cond. vuote $Eg \sim kT$

Per il silicio $Eg = 1.1 \text{ eV} \sim 40 \text{ kT} @ 300 \text{ K}$
Solido tetraedrico

2. Portatori: elettroni e lacune (= ruote)

n = densità numerica di elettroni (cm^{-3})

$p = n$ n lacune = portatori positivi

in genere dipendono dalla posizione nel cristallo

$n(x)$, $p(x)$.

All'equilibrio, senza E $\rightarrow n = p = n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

i = intrinseco = senza drogaggio

3. Droganti: sostituzioni nel reticollo cristallino

$\text{Si}^+(\text{+4}) \rightarrow \text{P}^+(\text{+5})$ un elettrone di troppo

$\text{Si}^+(\text{+4}) \rightarrow \text{B}^+(\text{+3})$ un elettrone di meno

Donori \Rightarrow livello pieno vicino alle bande di conduzione \rightarrow tutti ionizzati $n = N_D$



Tipo n



Accettori \rightarrow livello giusto vicino alle bande di valenze \rightarrow tutti riempiti

$$P = N_A \quad \text{Tipo p}$$

E_C

E_V

Bilancio detegliato nelle misurazioni $h + h\nu \rightarrow e + h \Rightarrow np = \text{cost}(T) = n_i^2$

$$\frac{dn}{dt} = -(\text{ricomb}) + (\text{generazione}) = G - R = g(T) - rnp = 0 \Rightarrow np = \text{cost}(T)$$

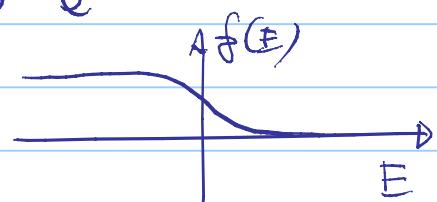
Per drogaggio di tipo n: $n = N_D \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$
 Per drogaggio di tipo p: $p = N_A \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$

(All'equilibrio)

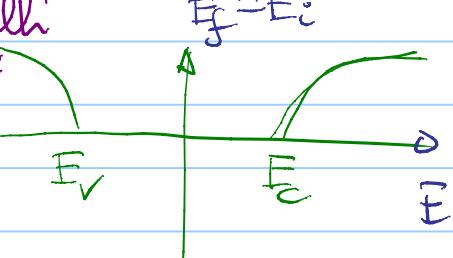
4. Energia di Fermi

Gli elettroni sono fermioni e seguono la statistica di Fermi. La prob. che uno stato di energia E sia occupato è

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



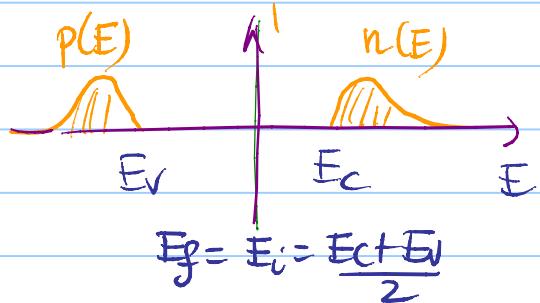
$$n(E) = f(E) g_c(E) \quad \begin{matrix} \text{prob} \\ \downarrow \\ \text{densità di livelli disponibili} \end{matrix}$$



prob che sia
visto \downarrow

$$p(E) = (1 - f(E)) g_v(E)$$

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n(E) dE ; p = \int_{-\infty}^{E_V} p(E) dE$$



$$E_F = E_i = \frac{E_C + E_V}{2}$$

Intrinseco.

Nel caso intrinseco: $n_i = \int_{E_c}^{\infty} \frac{g_c(E)}{1 + e^{(E-E_i)/kT}} dE$

Nel caso di droghaggio di tipo n: $n = N_D = \int_{E_c}^{\infty} \frac{g_c(E)}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} dE =$

 $= \int_{E_c}^{\infty} \frac{g_c(E) dE}{1 + e^{\frac{(E-E_i)-(E_f-E_i)}{kT}} e^{-\frac{(E-E_i)}{kT}}} \approx \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) e^{-\frac{(E-E_i)}{kT}} \cdot e^{\frac{(E_f-E_i)}{kT}} dE =$
 $(E_c - E_i \gg kT)$

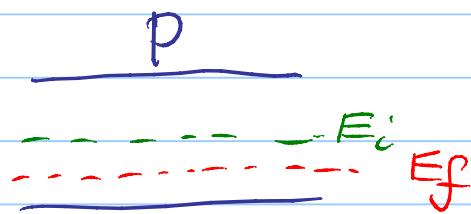
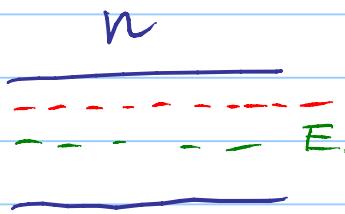
$N_D = n_i e^{(E_f-E_i)/kT} \Rightarrow E_{f_n} = E_i + RT \ln \frac{N_D}{n_i}$

Nel caso del droghaggio di tipo n, l'energia di Fermi si sposta verso la banda di conduzione.

Analogamente per droghaggio di tipo p,

si sposta verso la banda di valenze

 $N_A = n_i e^{-(E_f-E_i)/kT} \Rightarrow E_{f_p} = E_i - RT \ln \frac{N_A}{n_i}$



5. Correnti (movimenti dei portatori)

Tre tipi : mobilità, diffusione, generazione-n-combustione

campo elettrico
(conduzione)

gradienti di
concentrazione

transizioni
 $B.V. \leftrightarrow B.C.$

$$a. \text{ Mobilità} \quad \vec{V}_{\text{densa}} = \mu \vec{E} - \text{campo elettrico}$$

Diverse mobilità per elettroni e lacune:

$$\mu_n \approx 1450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$$

nel silicio
y densità di carica

$$\mu_p \approx 500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$$

$$\text{La densità di corrente} \quad \vec{J} = \rho \vec{v} = \rho \mu \vec{E}$$

$$\frac{e}{\vec{v}_e} \rightarrow v_e = -\mu_n E$$

$$J_n = (-q n) (-\mu_n E) = q n \mu_n E$$

$$n_h = \mu_p E \quad J_p = q p \mu_p E$$

$$J = (q n \mu_n + q p \mu_p) E \quad q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$\sigma = \text{condutibilità} \sim \text{S/cm}$

$$\text{Resistività} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q n \mu_n + q p \mu_p} (\Omega \text{ cm})$$

Esempio: per un Si drogato n, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$$n = N_D \quad p = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(10^{10})^2}{10^{15}} = 10^5 \text{ cm}^{-3} \rightarrow \text{trascurabile}$$

$$\rho_n = \frac{1}{q N_D \mu_n} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{15} \times 1.65 \times 10^3} = 4.3 \Omega \text{ cm}$$

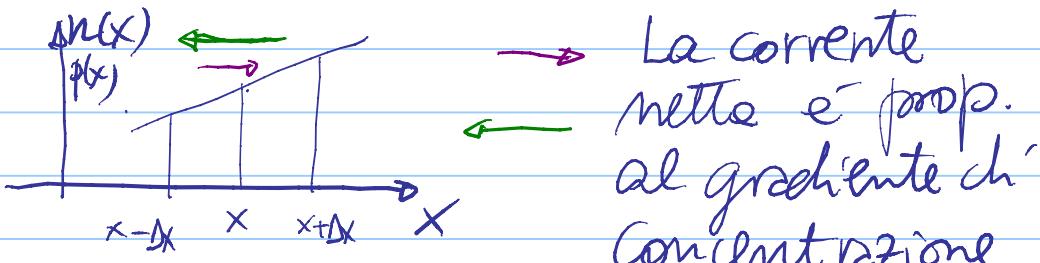
$$\text{Resistività intrinseca: } \rho_i = \frac{1}{q n_i (\mu_n + \mu_p)} = \\ = 1 / (1.6 \times 10^{-19} + 1.45 \times 10^{10} \times 2 \times 10^3) = 230 \text{ k}\Omega \text{ cm}$$

Limitazioni del modello di conduzione

- Ad alto campo elettrico la velocità satura
- Ad alto droggaggio la diminuisce

b. Diffusione

Se la concentrazione di portatori varia nello spazio \rightarrow tenderanno a spostarsi dalle zone più dense a quelle meno dense



La corrente netta è prop. al gradiente ch' concentrazione

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}, \quad J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

D_n, D_p : coefficienti di diffusione, legati alla mobilità (cammino libero medio)

$$D_n = \frac{RT}{q} \mu_n = 34.6 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_p = \frac{RT}{q} \mu_p = 12.3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = q D_n \frac{dn}{dx} - q D_p \frac{dp}{dx}$$

c. Generazione - ricombinazione

- all'equilibrio termico i ritmi di gen e ricombinazione sono uguali $\rightarrow J=0$
- Fuori equilibrio non è più vero \rightarrow corrente

3. Giunzioni p-n (NB: svolte senza livello di Fermi)

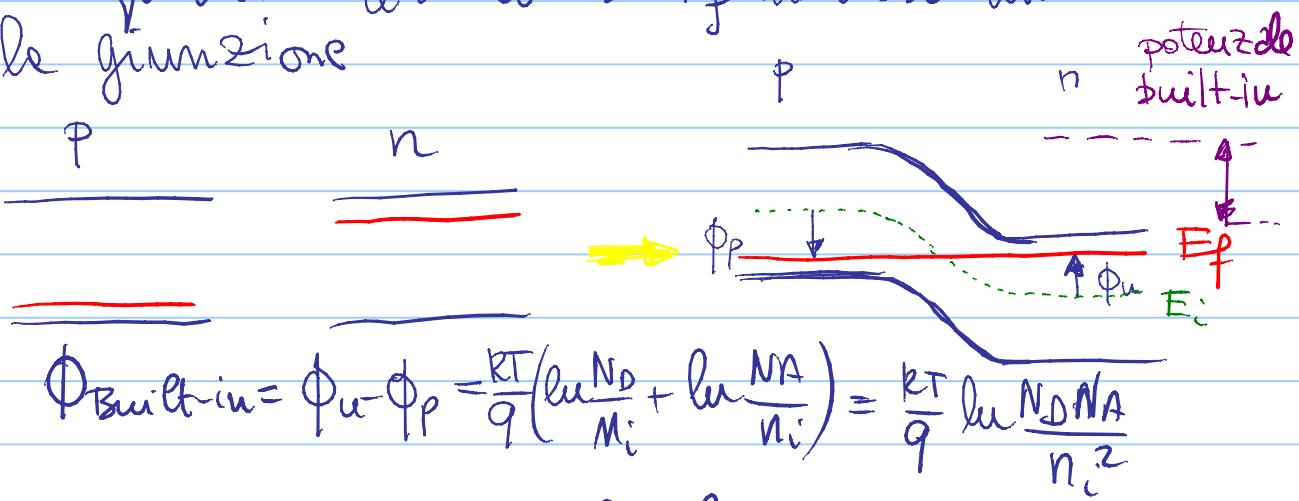
Titolo nota

2/20/2008

1. Giunzione

- Zona con variazione significativa della concentrazione di dopagente
- Si ottengono modificando selettivamente il dopaggio di una zona del cristallo
 - diffusione del dopante (ad alta temperatura)
 - impiantazione (sparo) del dopante
 - Aspetti tecnologici complessi
(De fere dopo le esercitazioni)
- NB: non basta accostare un Si p ed uno n, devono far parte della stessa struttura cristallina

All'equilibrio termico $\rightarrow E_F$ lo stesso attraverso la giunzione



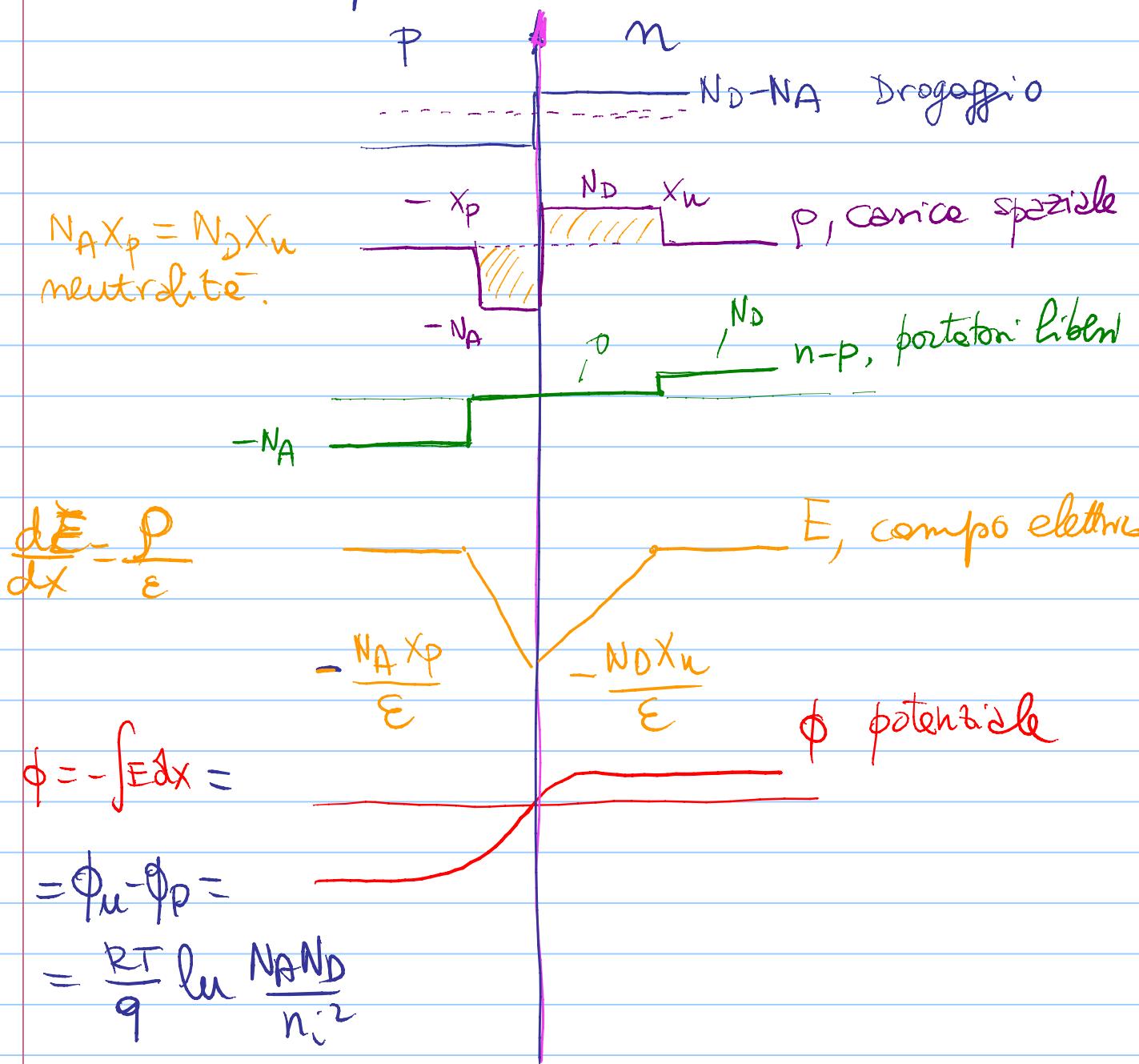
Un altro modo di vederlo: le correnti di diffusione all'equilibrio deve bilanciare le condutture (per e e h separatamente)

$$\left\{ \begin{array}{l} q D_n \frac{dn}{dx} + n q \mu_n \mathcal{E} = 0 \\ -q D_p \frac{dp}{dx} + p q \mu_p \mathcal{E} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Soluzione} \\ \text{Complicata} \end{array}$$

2. Giunzione di gradi di approssimazione

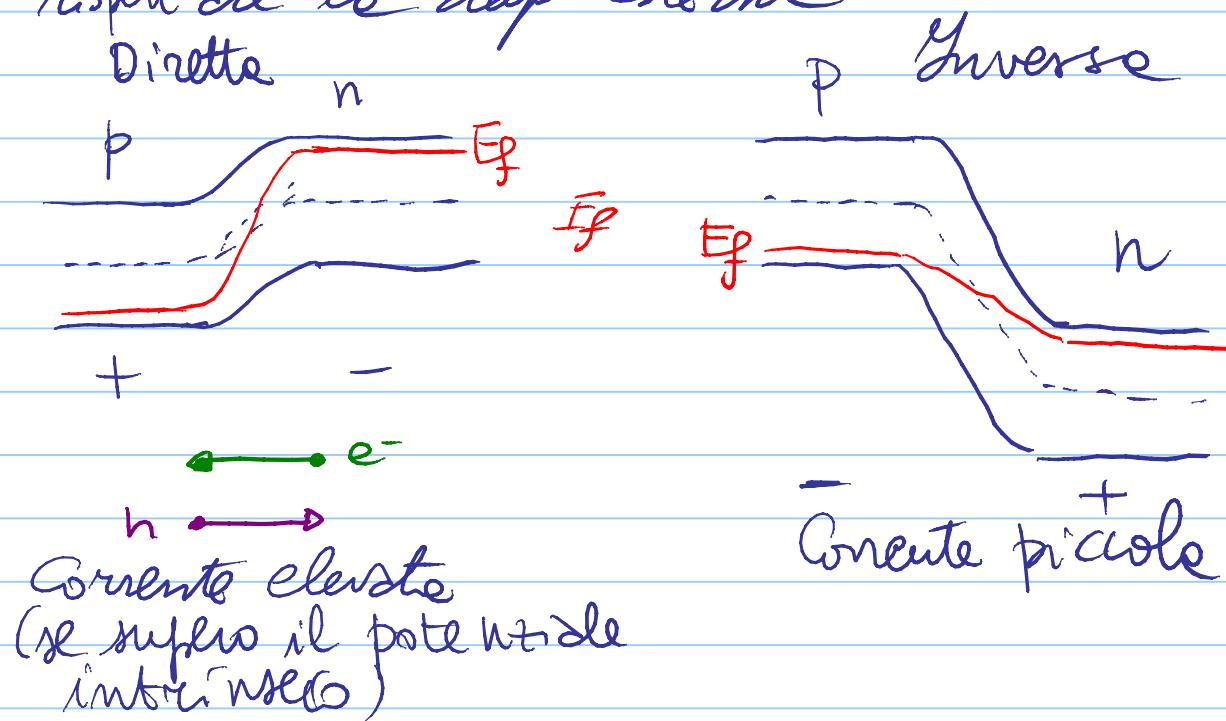
a. Appross di svuotamento: nelle zone vicine alla giunzione $N_D \approx 0 \rightarrow$ non ci sono portatori liberi. Rimane la carica dovuta ai dopanti. Donor \rightarrow Carica positiva N_D (valenze 5) Acceptor \rightarrow Carica negativa $-N_A$ (valenze 3)

b. Appox di quasi neutralità: nelle zone lontano dalla giunzione $N_D \approx N_A \rightarrow$ neutro, con campo elettrico = 0.



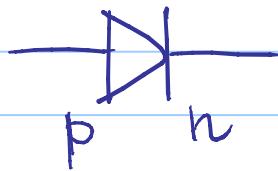
3 Polarizzazione

- Se applico una tensione esterna, la giunzione non si trova più all'equilibrio termico \rightarrow fornisce energia dall'esterno.
- Le bande si deformano in modo da rispettare le dipendenze esterne

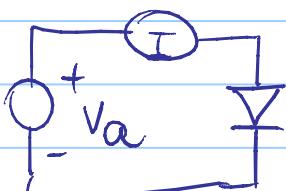


4. Il diodo

Giunzione per i cui estremi sono collegati ai terminali

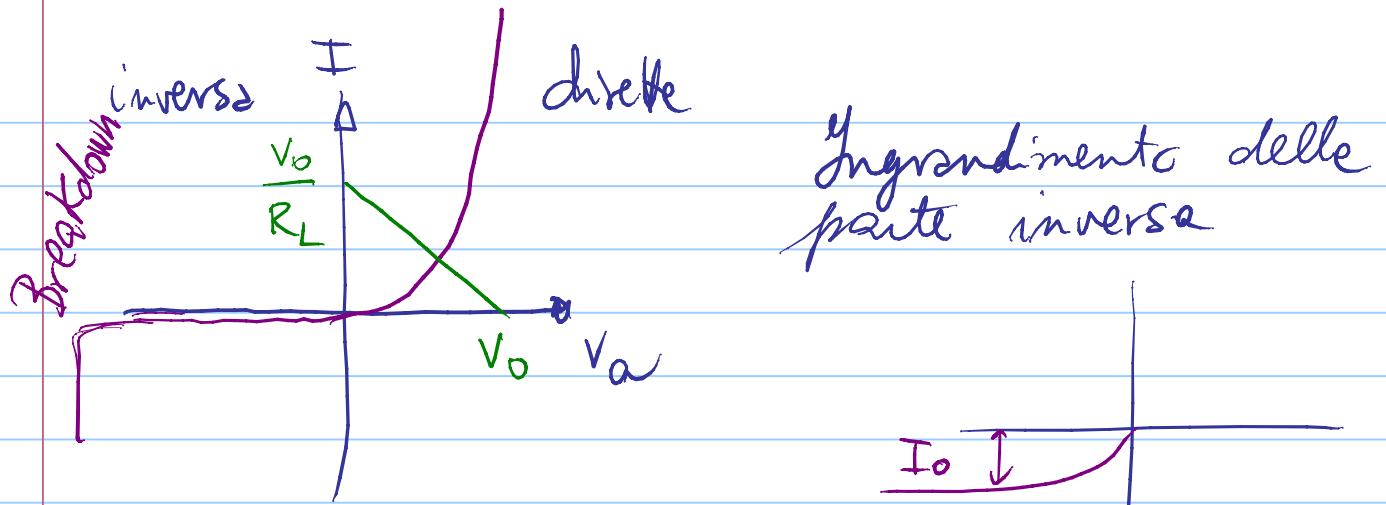


Primo esempio di elementi NON lineari.
Scriviamo la curva caratteristica



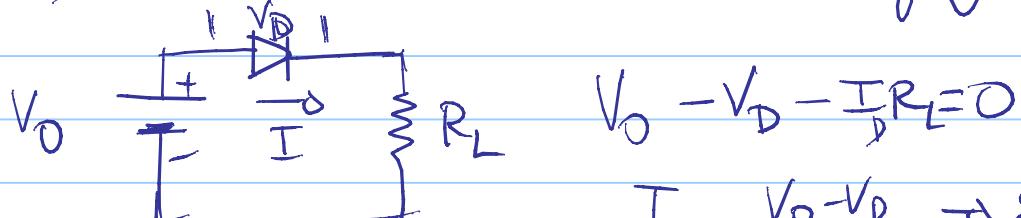
$$I = I_0 \left(e^{\frac{V_a}{mV_T}} - 1 \right)$$

corrente inversa $m \approx 2$



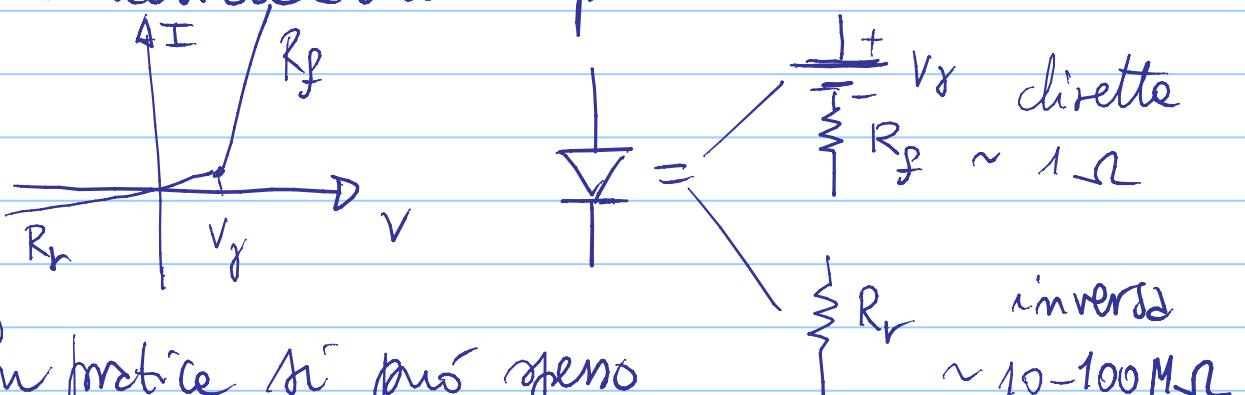
Come si tratta un elemento non lineare?

1) Retta di carico e soluzione grafica



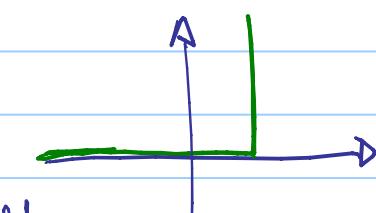
$$I_D = \frac{V_o - V_D}{R_L} \rightarrow \text{sul grafico}$$

2) Linearizzazione a pezzi



In pratica si può spesso assumere $R_r \rightarrow \infty$
 $R_f \rightarrow 0$

$$V_F \sim 0.6-0.7 V$$



E' necessario analizzare il circuito per decidere se il diodo è in inverso o diretto.

Inverso = circuito aperto
 Diretto = caeono 0.7 V

5. Capacitor (Non svolto)

La capacità del diodo gioca un ruolo in circuiti a frequenza più elevata.
Due aspetti principali:

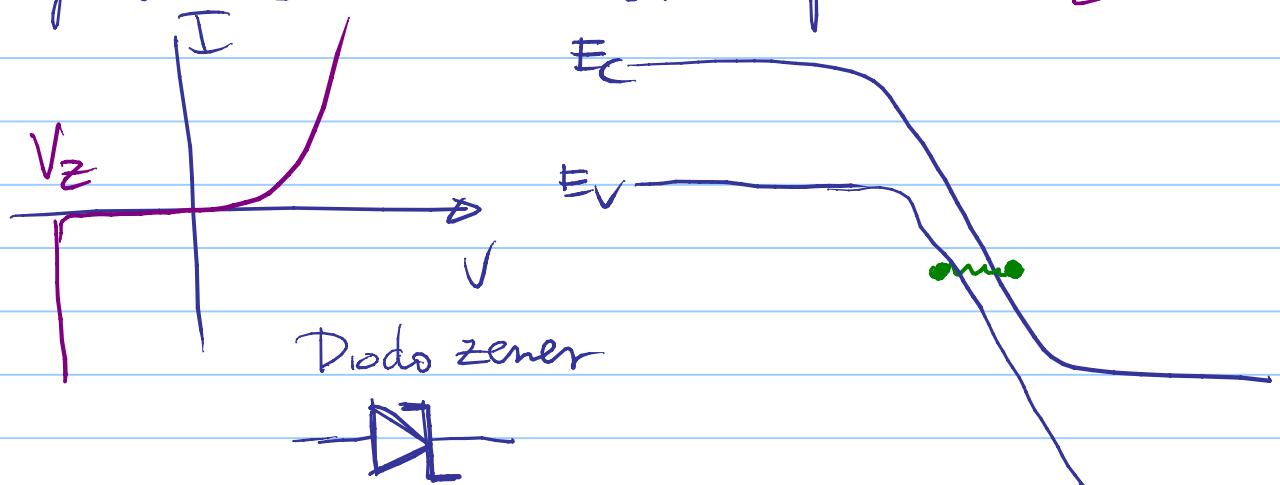
- Capacità in inversa: determinata dalla spessore delle zone sottostate → dipende da $1/V$. Utile per fare disponibile un cap. costante con la tensione → diodi Varicap
- Capacità in diretta: la carica accumulata non può essere rimossa istantaneamente → tempo di tensione diretta \rightarrow inverso
Per modellare il diodo completamente devo inserire anche queste capacità



6. Diodi Zener

In tutti i diodi se la tensione inversa cresce oltre un certo valore le corrente esplode. Questo può portare alla distruzione del diodo.

Diodi zener: il droppaggio è fatto in modo che dominino il tunneling tra le bande, con la corrente che esplode ad una tensione precisa V_z



→ Importante usare una resistenza in serie che limiti la corrente!

→ Nelle prossime lezioni circuiti con diodi.
Guardare il datasheet.