

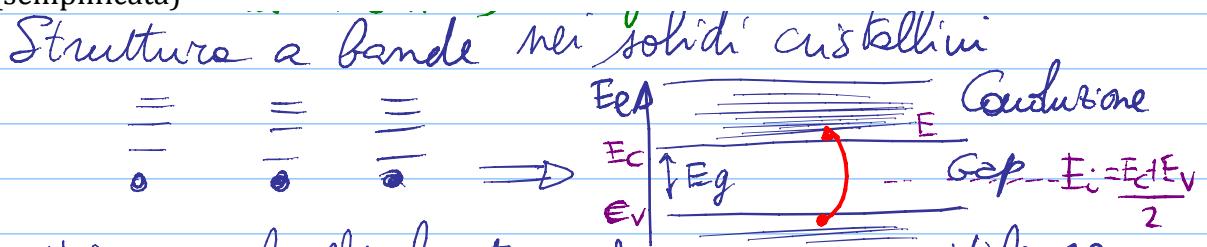
Lez. 4 Semiconduttori e giunzioni. Il diodo.

Testo di approfondimento: Muller-Kamins, Integrated Devices Electronics

1. Struttura a bande e semiconduttori
2. Portatori e droganti
3. Correnti nei semiconduttori
4. Giunzioni e diodi
5. Polarizzazione e curva caratteristica

1. Struttura a bande nei solidi cristallini.

(semplificata)



Valenze: livelli legati agli atomi nel reticollo cristallino - monocrystallo

Condusione: livelli in cui gli elettroni sono liberi di muoversi

Band gap: zone proibite, senza livelli.

- Conduttori: banda di cond. parzialmente piene

- Isolanti: banda di valenze piene $E_g \gg kT$

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

Per il Silicio $E_g = 1.1 \text{ eV} \sim 40 \text{ kT} @ 300 \text{ K}$

Altri semiconduttori: Germanio (Ge), Arseniuro di Gallio (GaAs), InSb, CdTe, Moltissimi altri. Parleremo solo del Silicio.

2. Portatori e Droganti

Portatori: elettroni e lacune (= ruote)

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

p = n a lacuna = 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

Droganti: sostituzioni nel reticollo cristallino

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

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

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



Tipo n

E_V

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

$P = N_A$ Tipo p



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

$$\frac{dn}{dt} = -(\text{ricomb}) + (\text{generazione}) = G - R =$$

$$= g(T) - r np \Rightarrow np = \text{cost}(T)$$

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

(All'equilibrio)

3. Correnti nei semiconduttori

Ci sono tre tipi di correnti: conduzione, diffusione, generazione-ricombinazione.

Conduzione: dovuta al campo elettrico

Diffusione: dovuta al gradiente di concentrazione dei portatori

Gen-ric: dovuta al non equilibrio del bilancio dettagliato

$$a. \text{ Mobilità} \quad \vec{v}_{\text{deriva}} = \mu \vec{E} \quad \text{campo elettrico}$$

Diverse mobilità per elettroni e lacune.

$$\mu_n \approx 1450 \text{ cm}^2/\text{V.s} \quad | \text{ nel Silicio}$$

$$\mu_p \approx 500 \text{ cm}^2/\text{V.s} \quad | \text{ densità di carica}$$

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

$$\vec{v}_e = -\mu_n E \quad J_n = (-q_n)(-\mu_n E) = q n \mu_n E$$

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

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

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

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

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

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

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

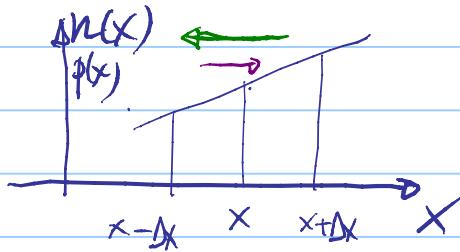
$$\text{Resistività intrinseco: } \rho_i = \frac{1}{q n_i (\mu_n + \mu_p)} = \\ = 1 / (1.6 \times 10^{-19} \times 1.45 \times 10^{10} \times 2 \times 10^3) = 230 \text{ k}\Omega \text{ cm}$$

Limitazioni del modello di conduzione:

1. Ad alto campo elettrico la velocità satura
2. Ad alta concentrazione di droganti la mobilità si riduce
3. Presuppone molti urti con il reticolo. Per piccole distanze i portatori diventano balistici

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 di 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 generazione e ricombinazione sono uguali $\rightarrow J=0$

Fuori equilibrio non è più vero, e si può generare una corrente.

Esempi: luce che incide su semiconduttore (celle solari); una polarizzazione esterna può dare corrente anche in assenza se conduzione/diffusione si compensano.

4. Giunzioni e diodo

Giunzione è una zona con una variazione significativa della concentrazione di drogante
Ottenute attraverso una modifica selettiva del drogaggio in una zona del cristallo

- Diffusione di drogante (ad alta temperatura)
- Implantazione di drogante

Tecnologia complessa.

NB: non basta accostare un Si p ed uno n, devono essere parte della stessa struttura cristallina.

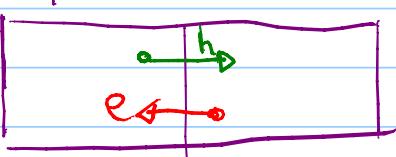
Giunzione p-n: zona in cui il drogaggio passa (bruscamente da p ad n).

Lato p: densità di accettori $N_A \rightarrow p = N_A$

Lato n: densità di donori $N_D \rightarrow n = N_D$

A causa del gradiente di densità gli elettroni dal lato n vanno verso il lato p e si ricombinano con le lacune. Quindi dal lato p si forma una carica negativa (elettroni in eccesso) mentre dal lato n si forma una carica positiva (elettroni mancanti). La corrente dovuta al campo elettrico bilancia la corrente di diffusione.

Un altro modo di vederlo: la corrente di diffusione all'equilibrio deve bilanciare la conduzione (per e e h separatamente)

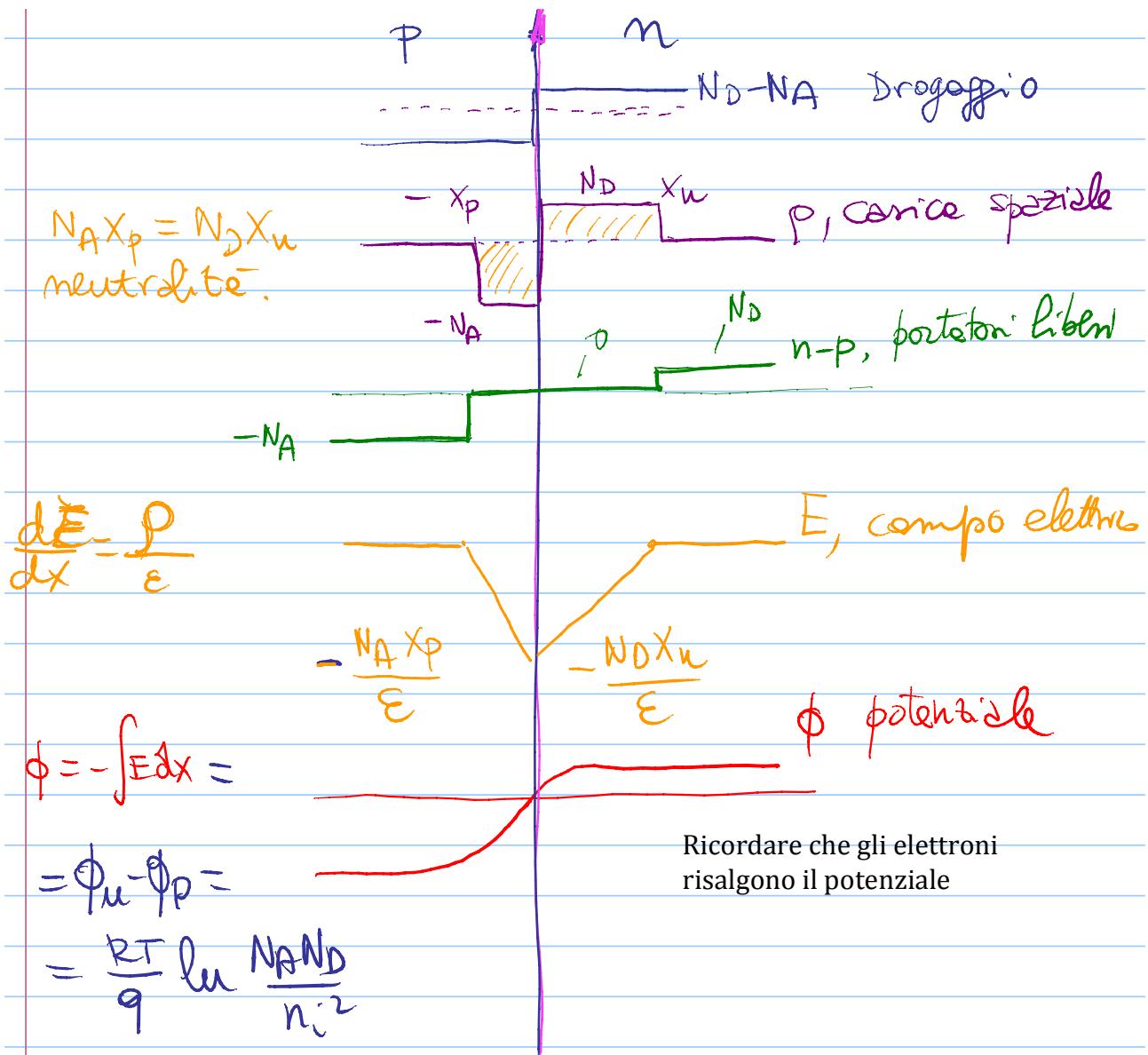


$$\left. \begin{array}{l} qD_n \frac{dn}{dx} + mq\mu_n E = 0 \\ -qD_p \frac{dp}{dx} + phq\mu_p E = 0 \end{array} \right\} \text{Soluzione Complicata}$$

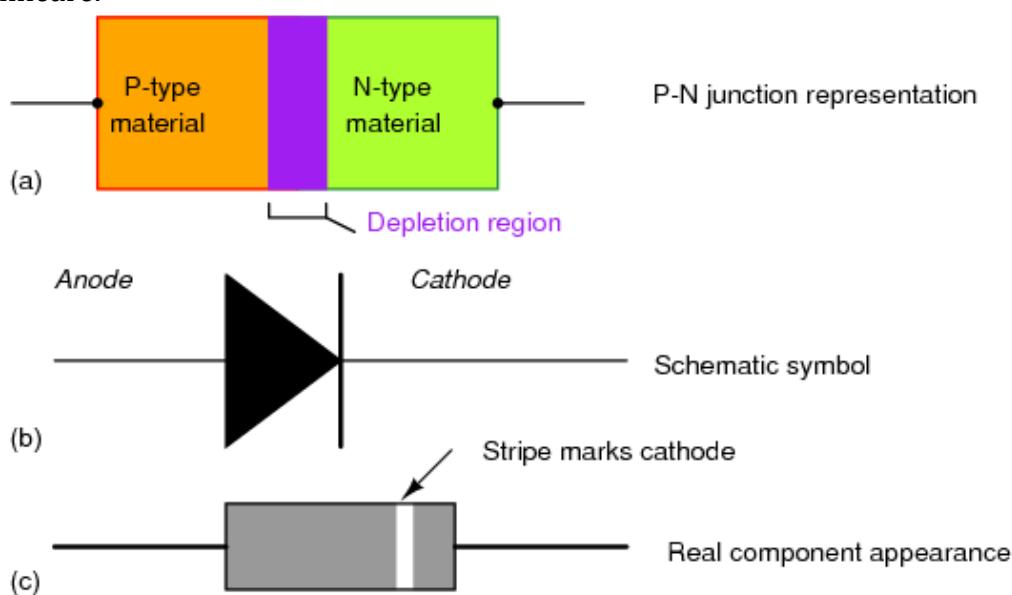
Giunzione è gradino approssimato

a. Appross di svuotamento: nelle zone vicine alle giunzione $n \approx 0 \rightarrow$ non ci sono portatori liberi. Rimane la conce dovuta ai droganti.
Donor \rightarrow conce positiva N_D (istante 5)
Accettori \rightarrow conce negativa $-N_A$ (istante 3)

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

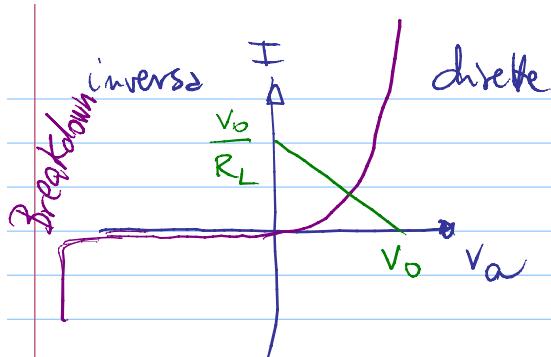
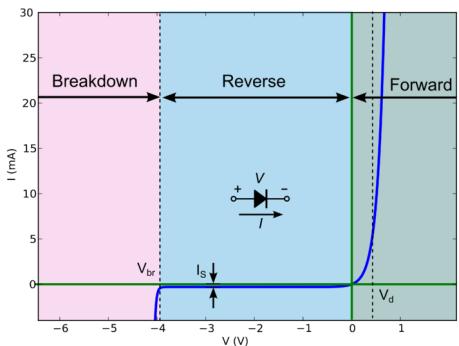


Una struttura p-n collegata ad elettrodi esterni è un diodo, un componente passivo NON lineare.



5. Polarizzazione e curva caratteristica

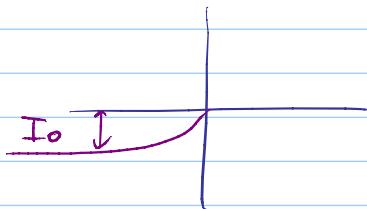
- Se si polarizza il lato p a tensione più elevata del lato n si favorisce la corrente (riducendo la barriera di potenziale) → polarizzazione diretta o forward bias
- Se invece si polarizza il lato p a tensione minore del lato n, si aumenta la barriera ed la corrente è molto piccola. → polarizzazione inversa o reverse bias
- Se il campo elettrico (inverso) è molto elevato, gli elettroni possono acquisire abbastanza energia tra un urto e l'altro da estrarre un altro elettrone dalla banda di valenza → avalanche breakdown, corrente elevata



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

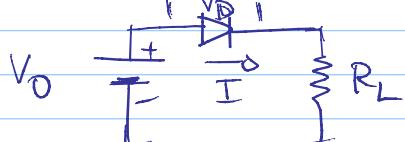
Corrente inversa $m \approx 2$

Ingrandimento delle
parte inversa



Come si tratta un elemento
non lineare?

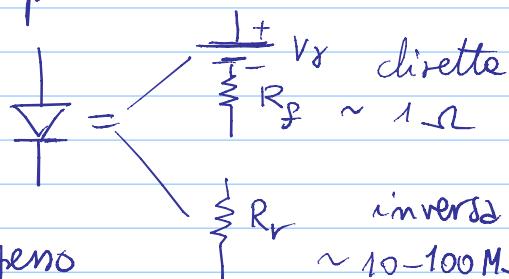
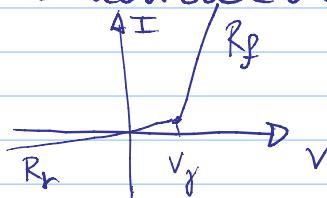
1) Rette di carico e soluzione grafica



$$V_0 - V_D - \frac{I}{R_L} R_L = 0$$

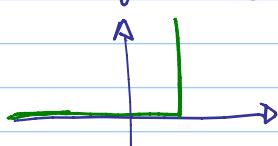
$$I_D = \frac{V_0 - V_D}{R_L} \rightarrow \text{sul grafico}$$

2) Linearizzazione a pezzi



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

$$V_D \sim 0.6 - 0.7 V$$



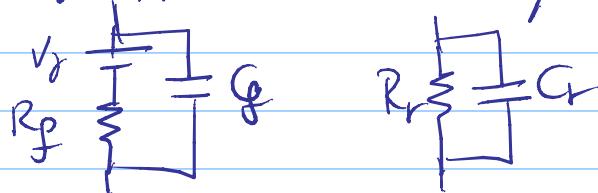
E' necessario
analizzare il circuito
per decidere se il
diodo è in inversa
o diretta.

Inversa = circuito aperto
Diretta = casono 0.7 V

Capacit 

La capacit  del diodo gioca un ruolo in circuiti a frequenza pi  elevata.
Due aspetti principali:

- Capacit  in inverso: determinata dalla spessore della zona svuotata - o dipende da $1/V$. Utile per fare dispositivo la cui cap. diminuisca con la tensione \rightarrow diodi Varicap
- Capacit  in diretta: la carica accumulata non pu  essere rimossa istantaneamente \rightarrow tempo di transizione diretta \rightarrow inverso
Per modellare il diodo completamente devo inserire anche queste capacit 



Principali tipi di diodi e caratteristiche

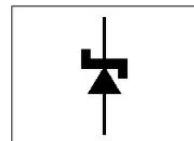
(vedi anche <http://en.wikipedia.org/wiki/Diode>)

Attenzione: consultare sempre il datasheet

Un diodo senza resistenza di limitazione \rightarrow si rompe.

Diodi a giunzione: semplici giunzioni pn. Da osservare: massima corrente, massima tensione inversa, capacit , massima potenza

Diodi Zener e avalanche: tensione di breakdown controllata e calibrata



LED: Light-emitting-diode: la ricombinazione di elettroni e lacune provoca l'emissione di luce (eventualmente in una cavit  \rightarrow laser diode)

Photo diode: diodo sensibile alla luce. La zona svuotata   esposta ai fotoni, che provocano una corrente di generazione (questa pu  essere anche provocata da particelle cariche \rightarrow rivelatori di radiazione).