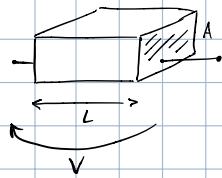
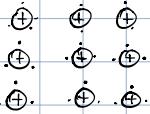


Materiali isolanti, conduttori e semiconduttori: cambia la resistività

CONDUZIONE



$$E = \frac{V}{l} \quad \left[\frac{\text{Volt}}{\text{m}} \right]$$



portatore di carica è l'elettrone (e), che si muove all'interno del materiale in maniera random (moto Browniano). Ma, applicando una tensione esterna si genera un campo elettrico \vec{E} e gli (e) si sono attratti, spostandosi in direzione opposta al campo (forza di Coulomb).

$$I = \frac{Q}{t}$$

#lettromi
q.m

* Convenzione degli utilizzatori

$$F = qE \quad (q = 1.6 \cdot 10^{-19} C)$$

Moto di deriva (DRAFT) delle cariche sottoponte a campo esterno:

Le cariche sono sottoposte a $F = Q \cdot E$, ma anche se $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ non vi è un moto uniformemente accelerato a causa dei continui urti tra iioni. Approssimando, si parla di velocità di drift $v_{drift} = \mu E$ con μ coeff. di mobilità

$$I = q \cdot \frac{\# \text{ elettroni}}{\text{tempo}}, \quad \phi = A \cdot m \cdot v \rightarrow I = q \cdot m \cdot A \cdot v_{\text{drift}} = q \cdot m \cdot A \cdot \mu \cdot E$$

\uparrow densità di e^-



ϕ flusso

$$\text{Allora, } \frac{I}{V} = \frac{1}{R} = \frac{q m \mu A}{L}, \quad R = \frac{1}{q m \mu} \cdot \frac{L}{A}$$

resistività $\rho = \frac{1}{\sigma}$, conducibilità $\sigma = qmp \Rightarrow$ Legge lineare tra lunghezza e resistenza del conduttore

Semiconduttori

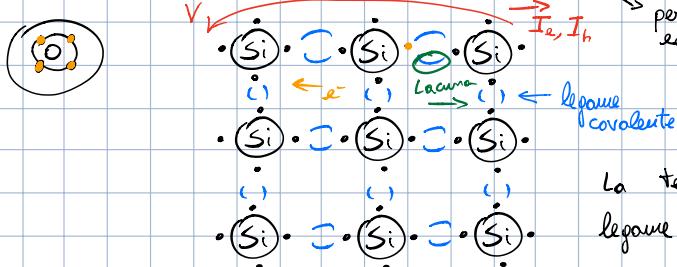
Si (silicio), conduttore

SiO_2 (anidro di silicio) isolante

I_e , IV colonna Tavola periodica: I_e nell'orbitale più esterno

1^a riga: 1_{*s*} elettroni in totale

Cristalli di silicio condividono 8 elettroni di valenza, a $T = 0^\circ\text{K}$ tutti gli e sono bloccati



$\mathcal{E} \quad I = \emptyset \Rightarrow$ ISOLANTE

A hand-drawn diagram of a tetrahedron, consisting of four vertices connected by lines representing edges. The word "forma" is written next to it, followed by "tetraedrica".

La temperatura > 0K dà energia all' e^- per spezzare il legame e la mancanza di 1 e^- nell'atomo è chiamata LACUNA (hole), con carica netta positiva. Applicando un CE esterno, anche la lacuna si muove, ruotando, nella direzione di \vec{E} , per completare il legame.

Quindi i semiconduttori hanno 2 portatori di carico: è libero e gli è nel legame covalente che creano una propagazione di carica descritta, per convenzione, come carica positiva che si sposta (poiché hanno l^e in mezzo). Entrambi si spostano a velocità diverse, con mobilità diverse.

$$- \text{Corrente total: } I_{\text{tot}} = I_e + I_h = q\mu_e m \frac{A}{L} V + q\mu_p p \frac{A}{L} V \quad \text{com } m = p$$

\uparrow hole

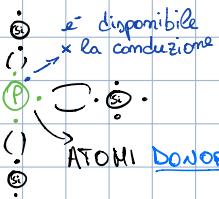
nel silicio "intrinseco" (non drogato), $\mu_e = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$, $\mu_h = 450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$

Se si può drogare: al posto di alcuni atomi si inseriscono altri elementi nel reticolo, della colonna III o II per ottenere un diverso numero di elettroni e lacune.

I colonna

Esempio col fosphoro P:

$M=1$ +15 carica positiva fissa, che completamente controbilancia quella negativa ma non può muoversi



DROGAGGIO DI TIPO N

Non c'è lacuna perché carica positiva è intrinseca nell'atomo (protomi del nucleo)

ATOMI DONORI: dona e perché #e di volenza è superiore rispetto al semiconduttore da drogare

DROGAGGIO DI TIPO P

Esempio Boro B:



ATOMI ACCETTOREI

$$N \sim 10^4 - 10^5 / \text{cm}^3$$

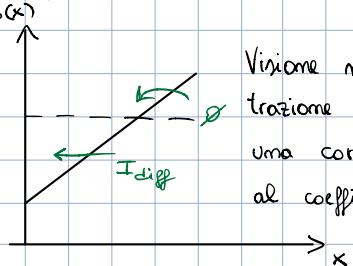
al max 1 atomo di Boro ogni 1000 di Si accetta e perché ha un #e di volenza inferiore al semiconduttore da drogare

I drogati li possiamo vedere come un nucleo positivo di 3 (o 5) protomi, bilanciato con 3 (o 5) elettroni. Se com un CE sposta la carica mobile, quel che rimane ha segno opposto a ciò che si sposta (es. per le lacune segno positivo).

l'uguaglianza
vale per l'intrinseco

Quando $m \neq p$ nell'N i maggioritari (minoritari) sono gli e- (lacune), nel P le lacune (e-). Tanti elettroni liberi (m) riducono le lacune (p) perché possono ricombinarsi e ciò comporta un prodotto costante $m.p$ (moto di diffusione).

$$\begin{aligned} I_{\text{diffusione}} &= -q D_p \frac{\partial p(x)}{\partial x} \\ &= -(-q) D_m \frac{\partial m(x)}{\partial x} \end{aligned}$$

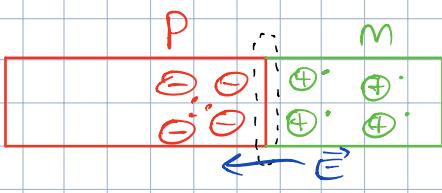


Visione monodimensionale: nello spazio x la concentrazione di lacune non è costante e questo genera una corrente I_{diff} di diffusione direttamente proporzionale al coefficiente di diffusione D.

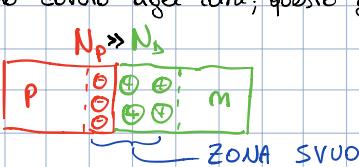
Cosa succede all'interfaccia tra due zone con drogaggi diversi?

La giunzione PN è l'interfaccia tra due semiconduttori a drogaggio diverso.

GIUNZIONE P-N: la presenza di lacune nella zona P e di e- liberi nella zona N determina un'interazione fra gli atomi in prossimità della giunzione: e- si ricombinano con le lacune della zona P; analogamente alcune lacune della zona P si diffondono ricombinandosi con gli m e- della zona N.



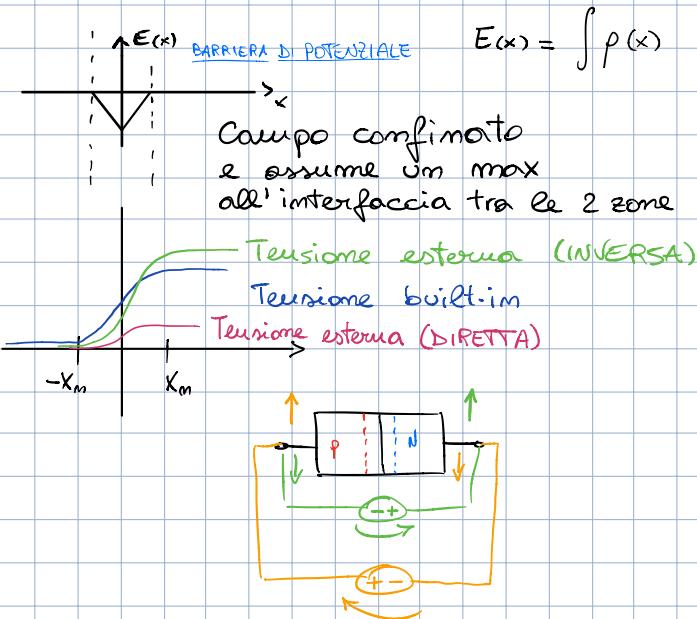
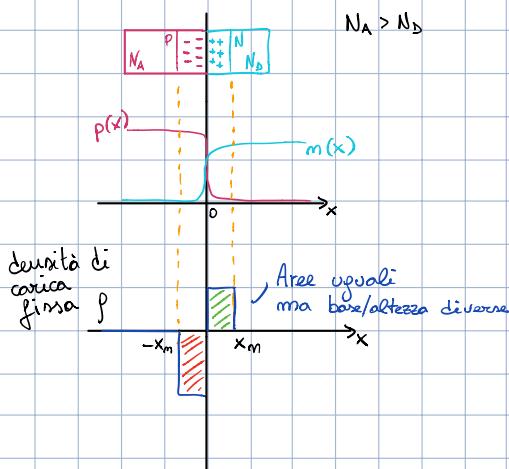
\Rightarrow Scompaiono i portatori liberi all'interfaccia perché elettroni e lacune si ricombinano, il bilancio si rompe con un eccesso di e- e uno m nelle due zone e il trasporto di carica tra queste zone. La regione è detta "zona di svuotamento" e si crea un CE interno dovuto agli ioni; questo genera una DPP detta potenziale di built-in.



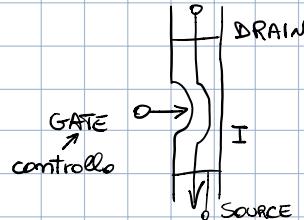
$$V_{\text{BUILT-IN}} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{m_i^2} \right) \quad \text{con } N_x \text{ dipendente dal drogaggio (e- Donori)}$$

$$m_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ @ } 300^\circ\text{K}$$

Applicando una tensione esterna concorde a quella di built-in la zona di svuotamento si allarga ostacolando il passaggio della corica. Il potenziale della zona P è inferiore a quello della zona N e il funzionamento è im **INVERSA**. Con una tensione im segno opposto, cioè nel verso degli e^- , si stringe la zona di svuotamento e funziona im **DIRETTA**, favorendo il passaggio della corica nel caso fosse maggiore del built-in.

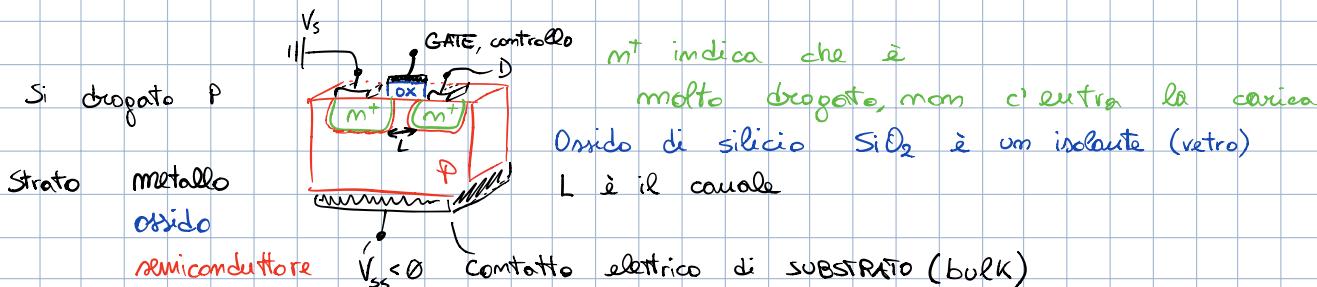


TRANSISTORE MOSFET (metallo ossido semiconduttore field effect transistor, ad effetto di campo)
(Anche detto MOS, controllato tramite CE)

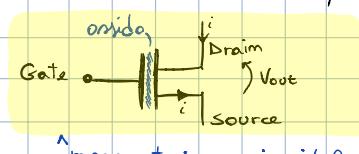


È un conduttore la cui conducibilità è controllata da un terzo elettrodo in tensione.

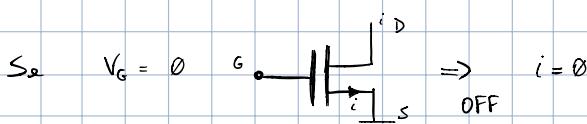
- MOSFET DI TIPO N (N-MOS)



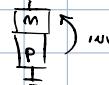
Due zone drogate N immerse in un substrato P e con un ossido in mezzo, su cui agisce un contatto di controllo. Il quarto contatto è il substrato.



Immaginiamo di fissare a 0 il source, il substrato ha una tensione < 0 , allora la zona N avrà una tensione più alta della zona P e la giunzione è im **INVERSA**. Lacune ed elettroni sono isolati dalla barriera P-N.



Funziona im INVERSA



INTERDIZIONE (transistor spento)

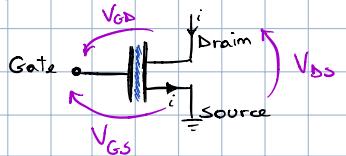
Alzando V_G : 0) Applico un CE

- 1) Riespingo le lacune e richiamo (attiro) gli elettroni
- 2) Si crea un canale di conduzione tra S e D. La tensione $V_G = V_{GS}$ che innescata questa inversione di popolazione prende il nome di tensione di soglia V_T ($\approx 1, 0.5 \div 2$ V).
- È la tensione che dà una concentrazione di portatori n uguale ai p.

Anche se $V_{GS} > V_T$, non si innesta alcuna conduzione di corrente tra D e S, essendo nulla la DDP ai loro capi.

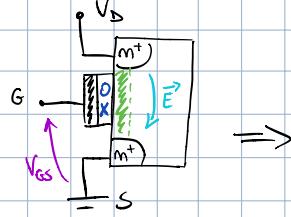
Calcoliamo la corrente che può scorrere: vediamo la zona metallo-isolante-metallo come un condensatore a facce piene parallele e ne calcoliamo la capacità.

Applichiamo una $V_{DS} \approx$ piccola



Canale: $|V_{GS} > V_T|$

Condizione di accensione



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

come un condensatore metallo-ossido-metallo (perché ci sono e^-)

$$C_G = \frac{E_{ox} \cdot A}{t_{ox}}$$



C_{ox} capacità dell'ossido

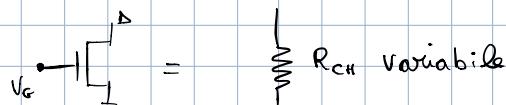
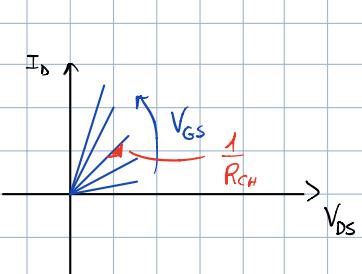
$$\Delta Q_{CH} = C_G \cdot \Delta V_{CH} = C_G (V_{GS} - V_T)$$

TENSIONE DI OVERDRIVE, dalla soglia > 0 sopra V_T

Δt è il tempo di transito, $\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{l}{\mu E} = \mu \frac{V_{DS}}{L}$

$$\Rightarrow I = \frac{C_G (V_{GS} - V_T)}{L / v_{DRIFT}} = \frac{C_{ox} \cdot W \cdot K (V_{GS} - V_T)}{L} \mu \frac{V_{DS}}{L} = C_{ox} \mu \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS} = K (V_{GS} - V_T) \cdot V_{DS} = \frac{V_{DS}}{R_{CH}}$$

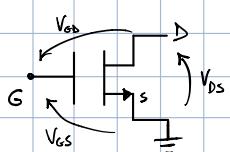
$$R_{CH} = f(V_{GS} - V_T)$$



ZONA OHMICA

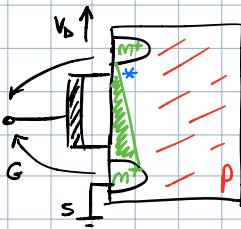
Il transistore funziona come un resistore variabile in funzione della tensione del Gate.

NOTA: m-MOS ha la corrente uscente dal Source

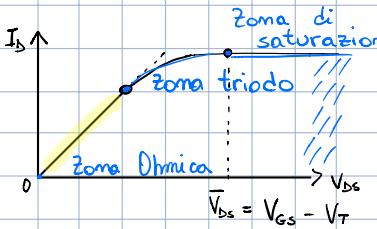


Se V_{DS} piccola $\Rightarrow V_D \approx V_S = 0$

Ma se aumenta V_{DS} incrementando la tensione V_D , quando $V_{DS} = V_T$ il canale si restringe strozzandosi* alla tensione di soglia. Il canale diventerà triangolare im Drain e calerà la corrente, raggiungendo un valore costante detto di "saturazione" e il transistore si comporterà come un generatore ideale di corrente e non più come un resistore modulato da V_D ; si dice che si troverà in zona di saturazione. La zona intermedia tra il regime lineare e quello nullo $I_D(V_D)$ è detta zona triodo.



* PUNTO DI PINCH-OFF



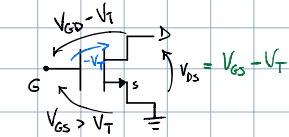
In saturazione il transistore è modellizzato come un generatore di corrente



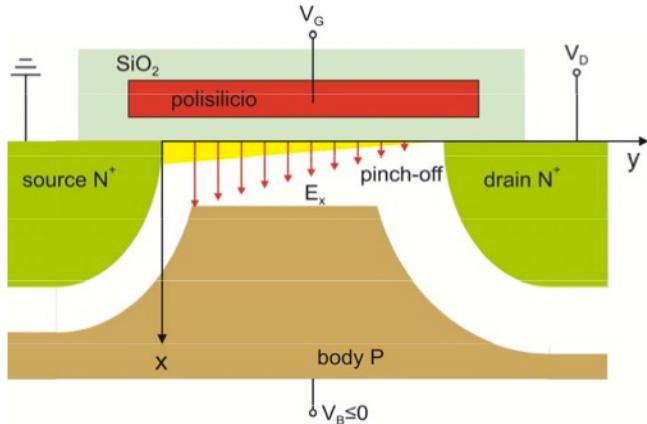
$$I_{SAT} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q_{CH}}{2} = \frac{1}{2} C_{ox} \cdot W \cdot L (V_{GS} - V_T) = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$[v_{Drift} = \mu \frac{V_{ds}}{L}]$$

$$= \frac{1}{2} K \left(\frac{W}{L} \right)$$

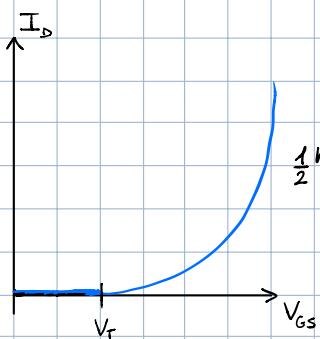
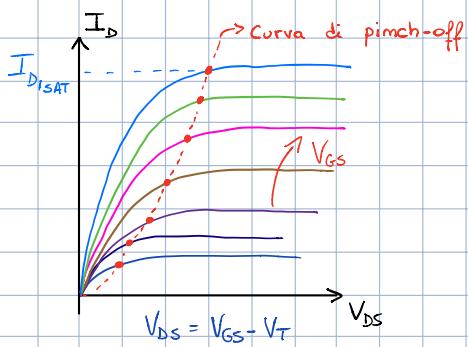


legame meno più lineare



V_{ds} assume un valore tale da "strozzare" (pinch-off) la carica di elettroni liberi in corrispondenza della regione di transizione body-drain. La corrente di drain I_d risulta indipendente da ulteriori incrementi della V_{ds} .

Curva caratteristica NMOS



L'ingresso in saturazione avviene per V_{ds} più alta all'aumentare di V_{gs} . Questo perché all'aumentare di V_{gs} ci sono più elettroni attratti nella regione $\frac{1}{2} K (V_{GS} - V_T)^2$ di canale e quindi ci vuole una tensione di drain più alta per provocare lo strozzamento degli stessi.

$$I_{D|TRIODO} = \underbrace{\frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L}}_K \left[2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

Ricapitolando, Transistor T

- OFF ($i = 0$ ca)
- ON ($V_{GS} > V_T$)
- SAT ($V_{DS} > V_T$)
- OHM ($V_{DS} < V_T$)

$$2K(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 = K(V_{GS} - V_T)V_{DS}$$

$$2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 = (V_{GS} - V_T)V_{DS}$$

$$(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2 = 0$$

$$\frac{V_{DS}}{I_{SAT}} = V_{GS} - V_T$$