



POLITECNICO
DI TORINO

DET

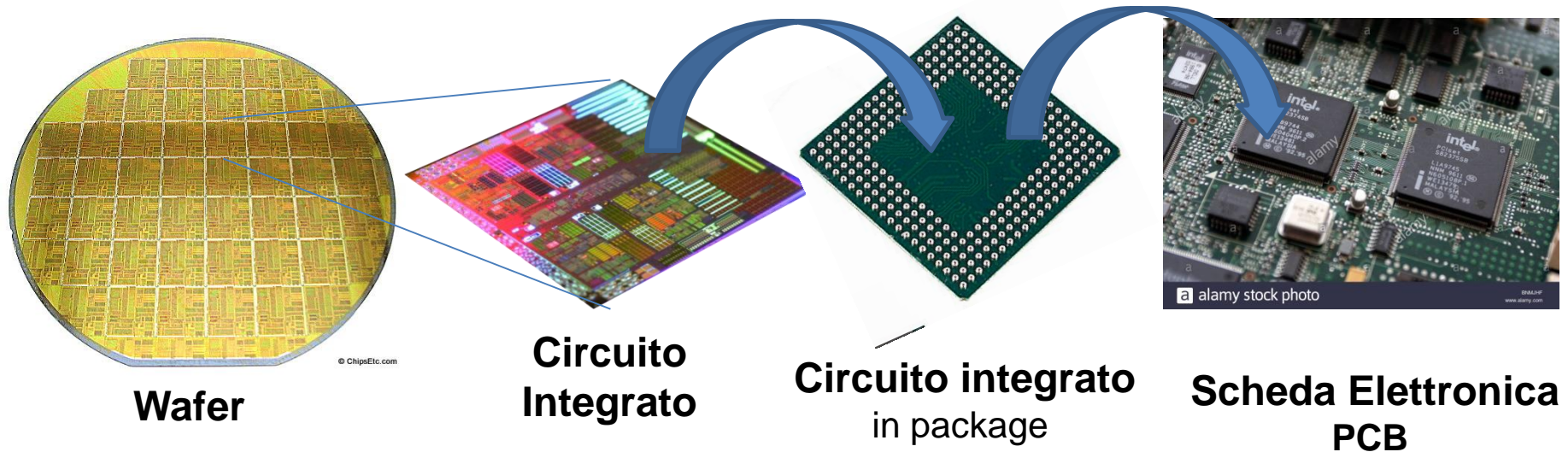
Department of Electronics and Telecommunications

Cenni di Fisica dei Dispositivi Elettronici a Semiconduttore (diodi a giunzione e transistori MOS)

Dispositivi Elettronici

- Il funzionamento dei sistemi elettronici si basa sulle caratteristiche dei ***dispositivi elettronici a semiconduttore***, fabbricabili in larghissima scala mediante la ***tecnologia dei circuiti integrati (Integrated Circuits, IC)***

Dimensioni dispositivi: ordine di 12nm
Dispositivi in un IC: $>10^8$
Frequenza di clock: $>10\text{GHz}$ (dig. clk)



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

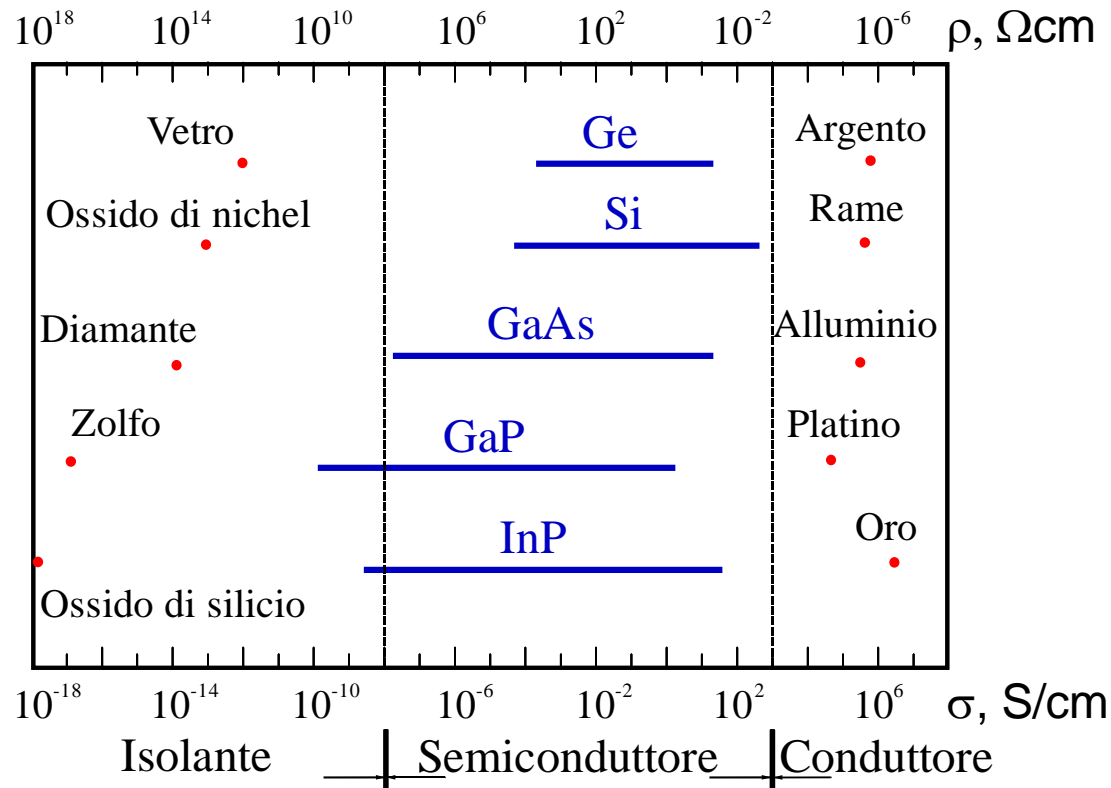
Concetti base

- **Semiconduttore**
 - ***Meccanismi di conduzione***
 - Elettroni e lacune
 - Banda di conduzione e di valenza
 - ***Semiconduttori drogati***
 - Drogaggio di tipo n e p
 - ***Giunzione pn***
 - all'equilibrio (no polarizzazione)
 - fuori equilibrio (=polarizzazione esterna)



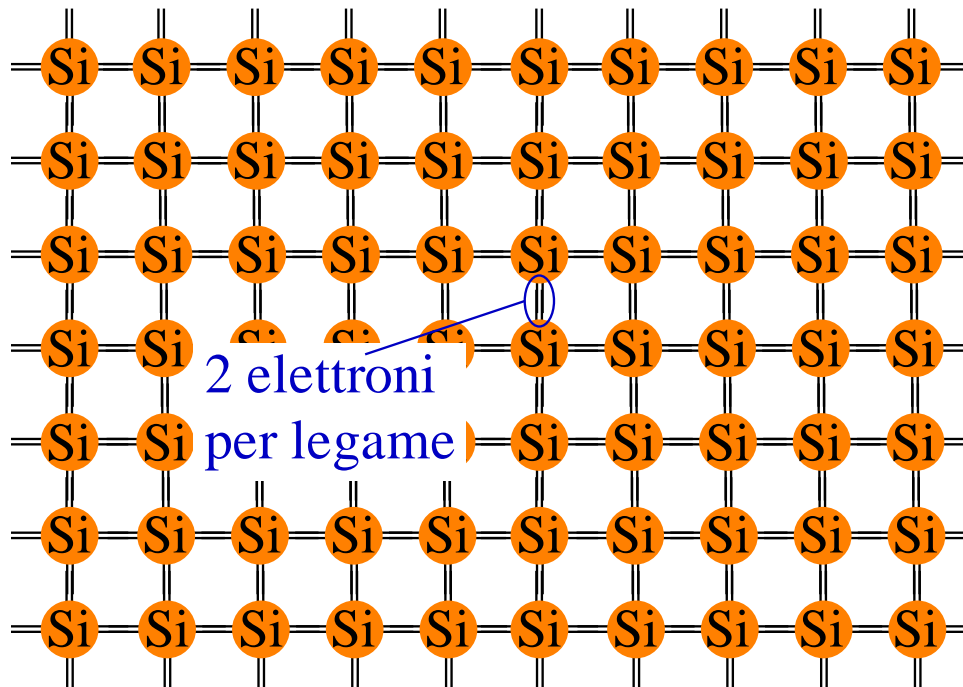
Semiconduttori

Semiconduttori: materiali (tipicamente solidi cristallini) con caratteristiche di conduzione (resistività ρ , conducibilità $\sigma = 1/\rho$) intermedie tra **isolanti** o **dielettrici** (= che non conducono corrente elettrica) e **conduttori** (= che conducono corrente in modo significativo)



Semiconduttori

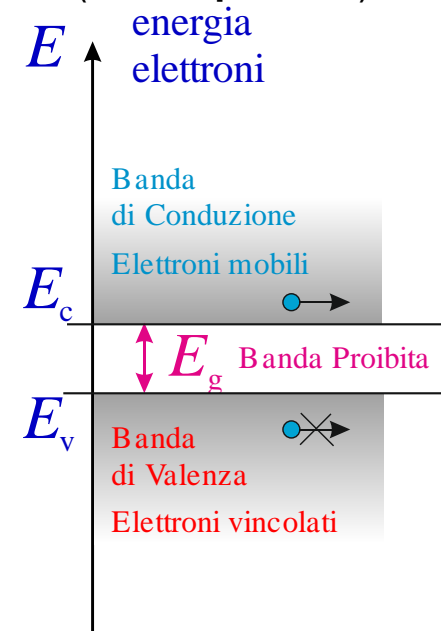
Silicio (IV gruppo) :
quattro elettroni esterni



Nel reticolo cristallino del Si, gli elettroni esterni a energia minore sono impegnati a formare legami (**banda di valenza, BV**)

Gli elettroni con energia maggiore sono liberi di muoversi (**banda di conduzione, BC**)

I limiti inferiori/superiori di BC e BV sono distinti e non sono consentiti livelli intermedi (**banda proibita**)



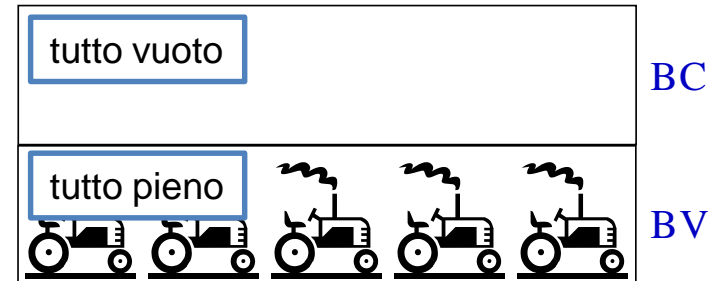
Semiconduttori

Nei semiconduttori la conduzione è legata a due meccanismi distinti:

- spostamento di elettroni liberi in banda di conduzione (**cariche negative**)

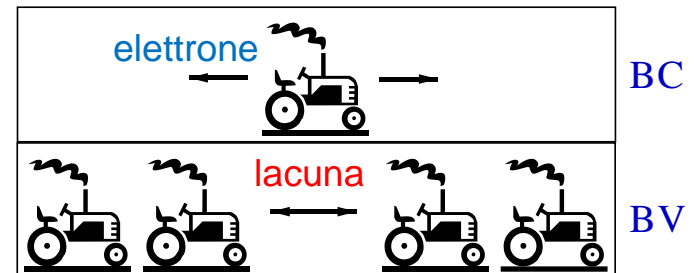
- spostamento di lacune (=mancanza di elettroni nei legami covalenti) in banda di valenza (**equivalgono a cariche positive mobili**)

Modello dell'autorimessa



No conduzione

Modello dell'autorimessa

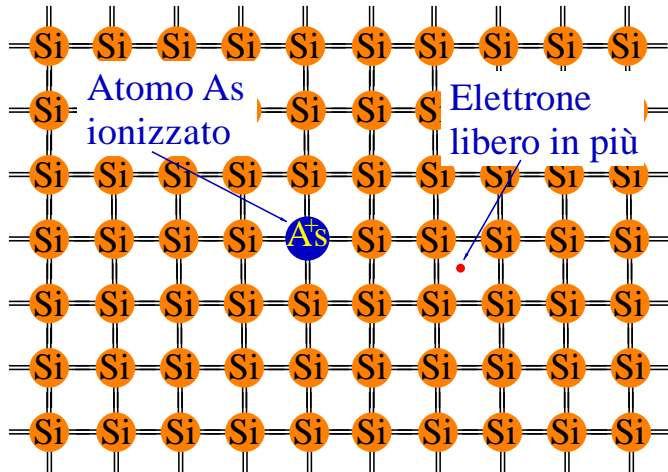


Sia gli elettroni sia le lacune, spostandosi danno luogo ad una corrente

Semiconduttori: Drogaggio

L'importanza dei semiconduttori risiede nella possibilità di **cambiarne la conducibilità elettrica** di diversi ordini di grandezza grazie all'introduzione di opportuni **atomi droganti**

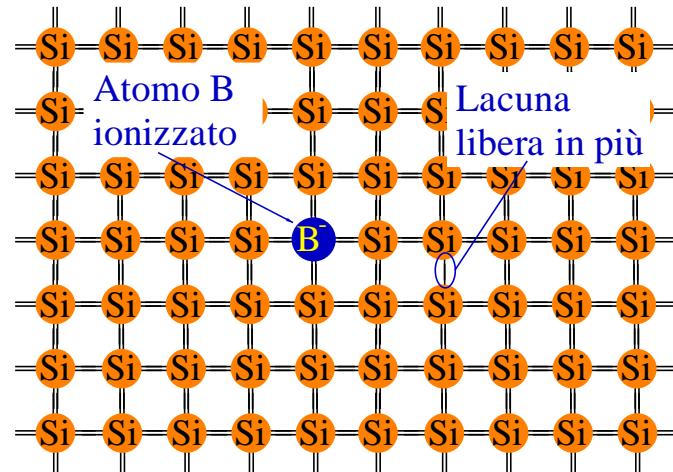
Silicio drogato *n*



atomi **donatori** (esempio: As o P per Si),
1 elettrone in più di Si nel guscio più esterno
→ semiconduttore **drogato *n***

per ogni atomo di drogante ionizzato:
1 carica negativa (elettrone) mobile
1 carica positiva fissa

Silicio drogato *p*



atomi **accettatori** (esempio: B per Si)
1 elettrone in meno di Si nel guscio più esterno
→ semiconduttore **drogato *p***

per ogni atomo di drogante ionizzato:
1 carica positiva (lacuna) mobile
1 carica negativa fissa



Giunzione p-n (Diodo)

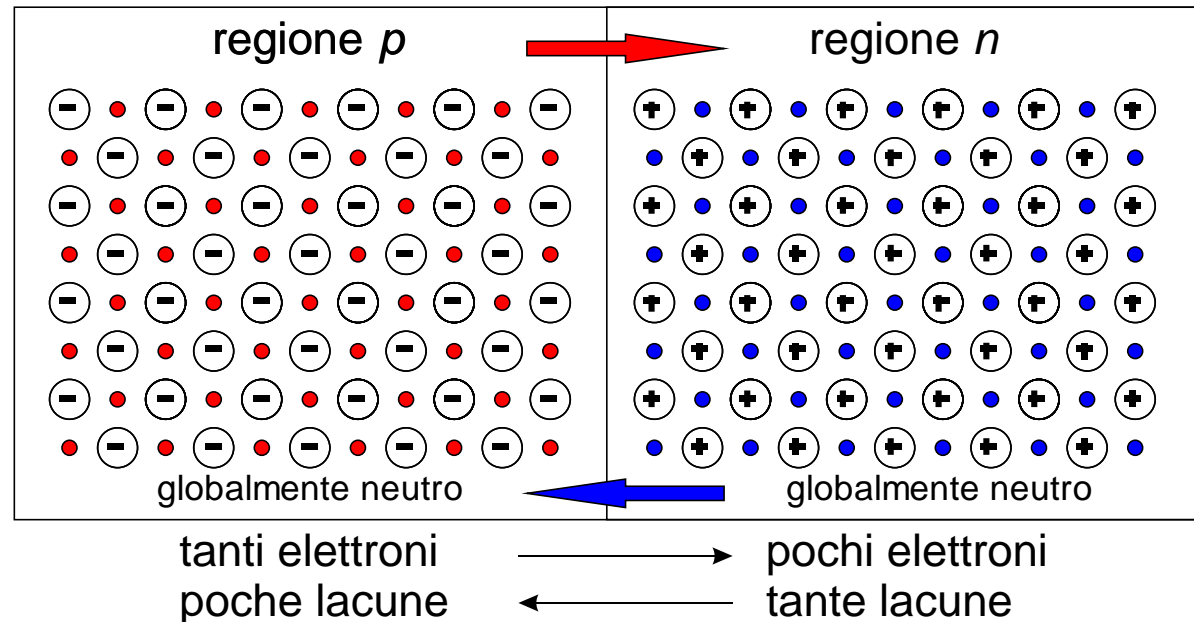
Si considerano una regione drogata p ed una regione drogata n sullo stesso cristallo semiconduttore

cariche fisse

- ⊖ accettatori (droganti p) ionizzati
- ⊕ donatori (droganti n) ionizzati

cariche mobili

- elettroni
- lacune



Diffusione: particelle libere di muoversi (ad es: gas) tendono a spostarsi dalle regioni in cui si la loro concentrazione è maggiore verso quelle in cui sono presenti in concentrazione minore

Le **lacune**, che sono maggioritarie nella regione p , si spostano per diffusione verso la regione n

Gli **elettroni**, che sono maggioritari nella regione n , si spostano per diffusione verso la regione p



Giunzione p-n (Diodo)

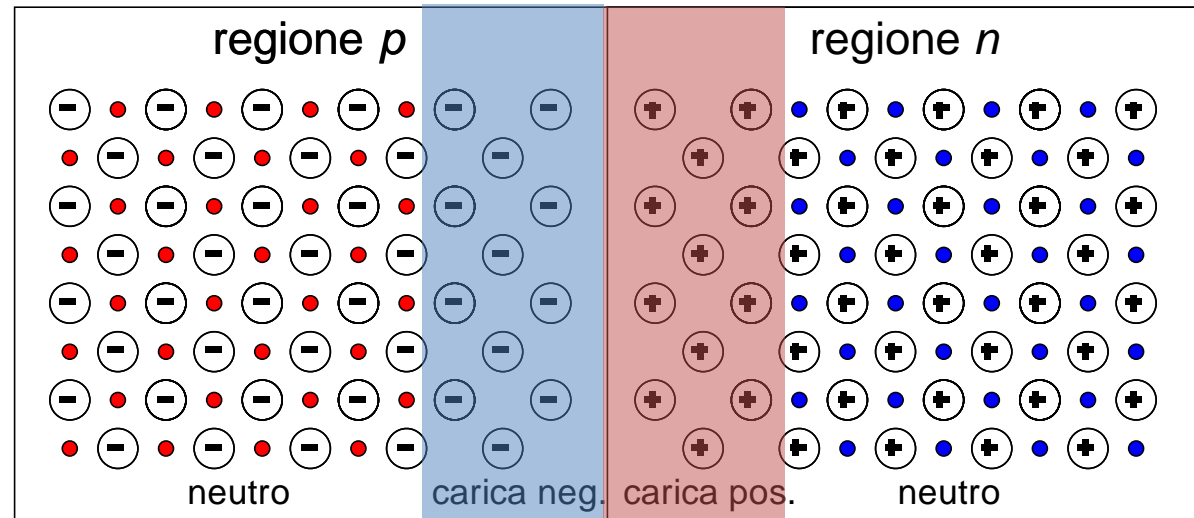
Si considerano una regione drogata p ed una regione drogata n sullo stesso cristallo semiconduttore

cariche fisse

- ⊖ accettatori (droganti p) ionizzati
- ⊕ donatori (droganti n) ionizzati

cariche mobili

- elettroni
- lacune



Regione di carica spaziale

Le **lacune**, che si sono spostate verso la regione n per diffusione, lasciano delle **cariche negative fisse non compensate nella regione p**

Gli **elettroni**, che si sono spostati verso la regione p per diffusione, lasciano delle **cariche positive fisse non compensate nella regione p**



Giunzione p-n (Diodo)

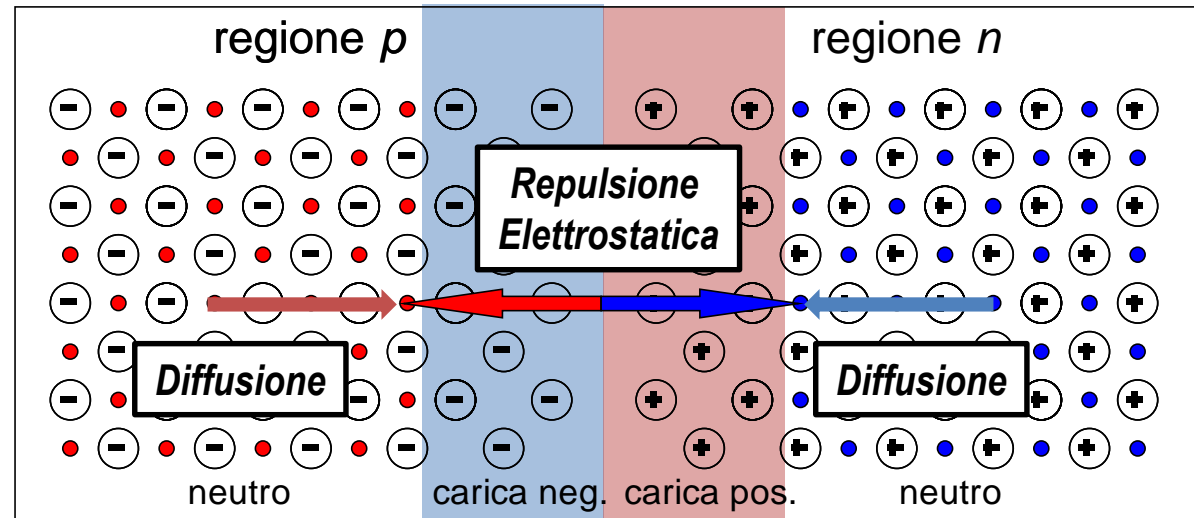
Si considerano una regione drogata p ed una regione drogata n sullo stesso cristallo semiconduttore

cariche fisse

- ⊖ accettatori (droganti p) ionizzati
- ⊕ donatori (droganti n) ionizzati

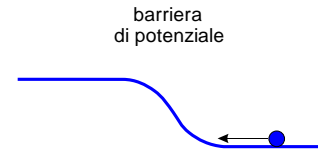
cariche mobili

- elettroni
- lacune

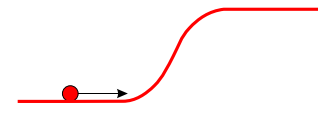


La **carica spaziale negativa sul lato p** respinge gli elettroni (cariche dello stesso segno) e ne contrasta la diffusione

energia potenziale elettroni



energia potenziale lacune



La **carica spaziale positiva sul lato n** respinge le lacune (cariche dello stesso segno) e ne contrasta la diffusione



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Giunzione p-n (Diodo)

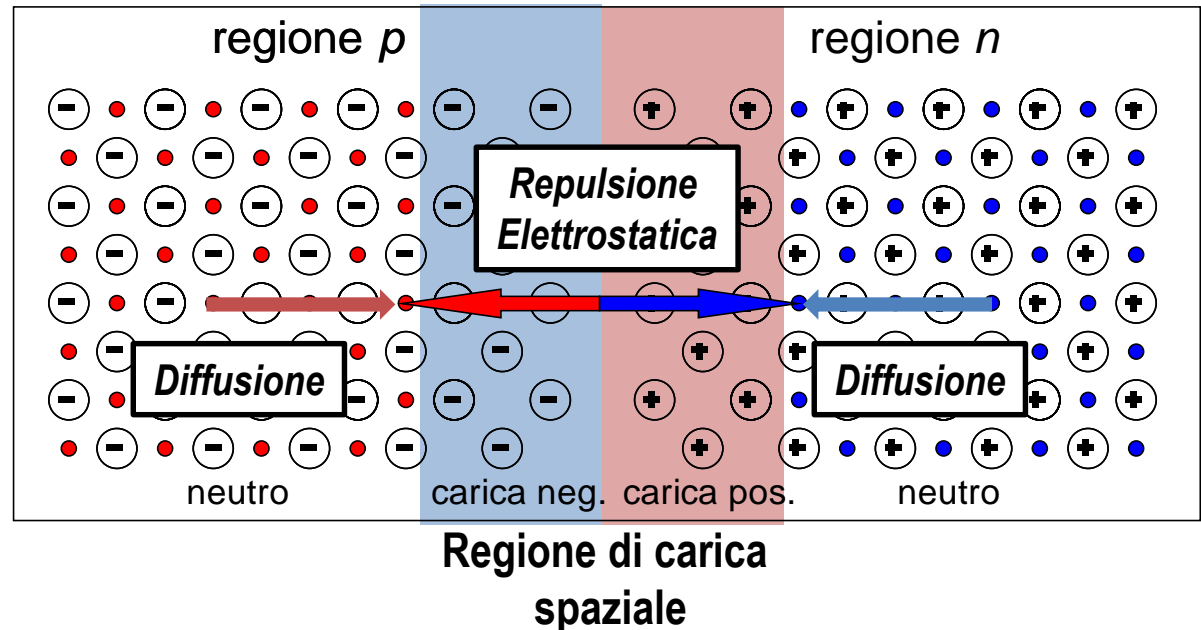
Si considerano una regione drogata p ed una regione drogata n sullo stesso cristallo semiconduttore

cariche fisse

- ⊖ accettatori (droganti p) ionizzati
- ⊕ donatori (droganti n) ionizzati

cariche mobili

- elettroni
- lacune



La **carica spaziale positiva (lato n)** respinge le lacune (stesso segno) e ne contrasta la diffusione verso la regione n

La **carica spaziale negativa (lato p)** respinge gli elettroni (stesso segno) e ne contrasta la diffusione verso la regione p

In assenza di polarizzazione esterna, si raggiunge una condizione di equilibrio termodinamico, in cui flusso netto di elettroni/lacune (=la corrente che attraversa la giunzione) è nullo.



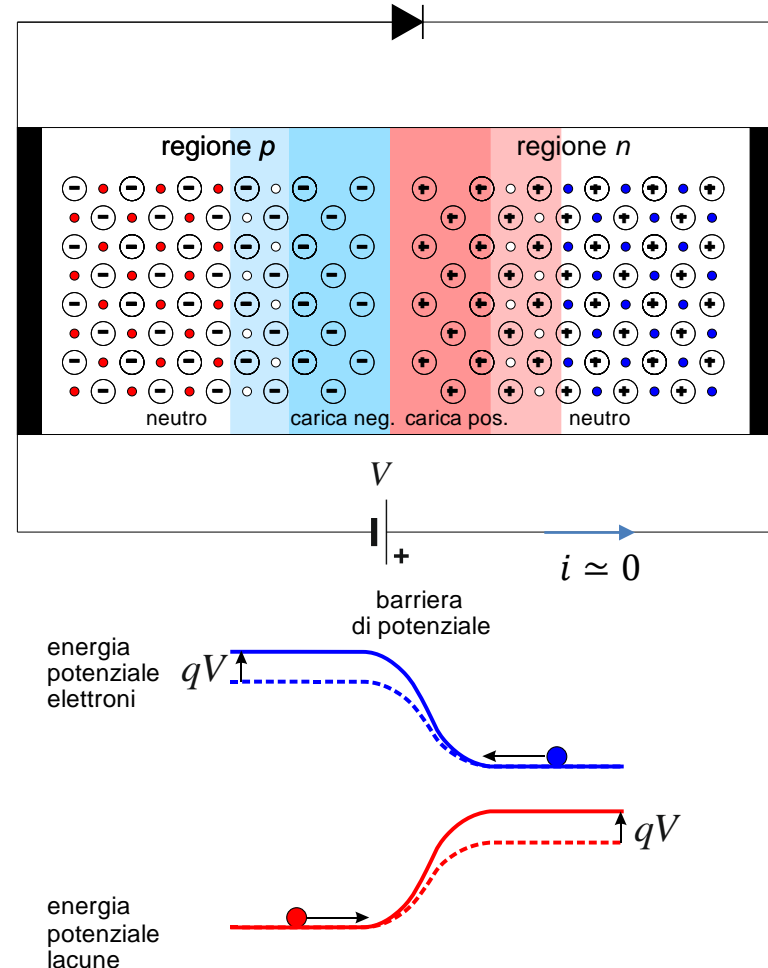
Giunzione p-n: polarizzazione inversa

Applicando una tensione esterna V alla giunzione, positiva sulla regione drogata n

- la regione di carica spaziale si allarga (accumulo di cariche come in un condensatore)
- la **barriera di potenziale** che impedisce la diffusione di elettroni da n a p e lacune da p ad n , **diventa più alta**

NON si ha passaggio di corrente significativo

Contribuiscono alla conduzione solo i pochissimi elettroni presenti nella zona p e le pochissime lacune presenti nella zona n , che non risentono della barriera di potenziale.



Giunzione p-n: polarizzazione diretta

Applicando una tensione esterna V alla giunzione, positiva sulla regione drogata p

- la regione di carica spaziale si riduce
- **la barriera di potenziale** che impedisce la diffusione di elettroni da n a p e lacune da p ad n , **diventa più bassa**

Si ha passaggio di
corrente significativo

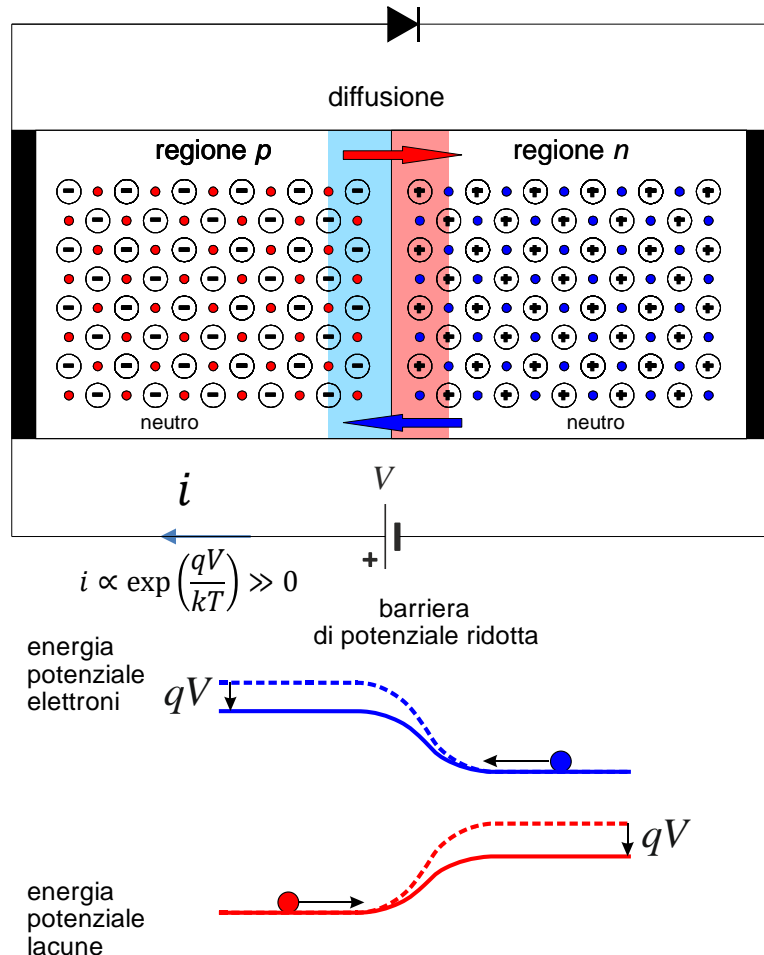
La diffusione dei portatori dalla regione in cui sono maggioritari a quella in cui sono minoritari è sempre meno ostacolata quanto più cresce la tensione diretta (positiva sulla regione p).

Dall'analisi della giunzione (non presentata in questo corso), si ricava la caratteristica tensione-corrente

$$i_D = I_S(e^{V/\eta V_T} - 1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \text{ (circa 26mV @ 300K)} \quad \eta \text{ fattore di non-idealità}$$

T temperatura assoluta
 k costante di Boltzmann
 q carica elementare



POLITECNICO
DI TORINO

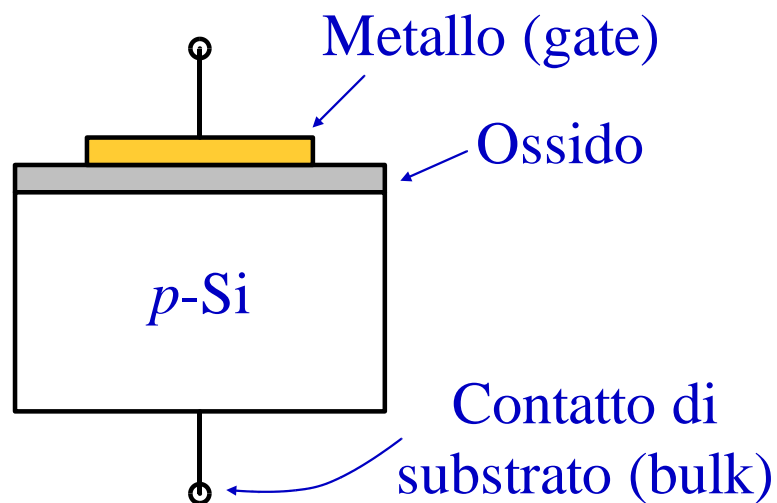
DET
Department of Electronics and Telecommunications

Concetti base

- Transistore MOS
 - ***Struttura Metallo-Ossido-Semiconduttore***
 - Regione di inversione e canale
 - ***Transistore MOS a quattro terminali***
 - Contatti di *drain* e di *source*
 - Formazione del canale e tensione di soglia
 - Controllo della conduzione tra *drain* e *source* attraverso il *gate* attraverso la tensione tra *gate* e *source*



Struttura Metallo-Ossido-Semiconduttore



Condensatore a facce piane parallele

Metallo-Ossido-Semiconduttore (MOS):

- un'armatura è in metallo (oppure di Si policristallino)
- il dielettrico è ossido di silicio SiO_2
- la seconda armatura è di semiconduttore (assumiamo Si drogato p)

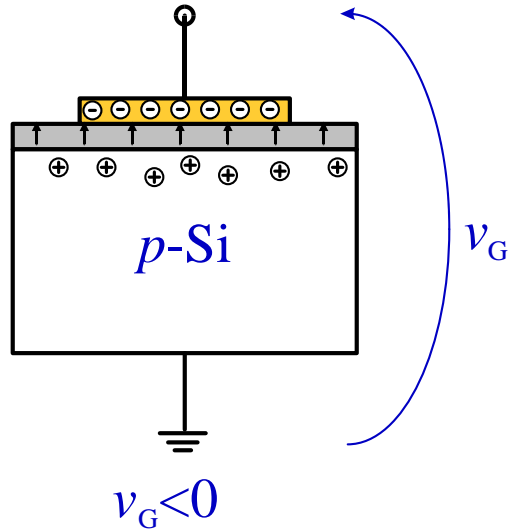
Idea base: cambiare le caratteristiche di conduzione **nel semiconduttore** applicando una **tensione di controllo** alle armature del condensatore MOS



Struttura Metallo-Ossido-Semiconduttore

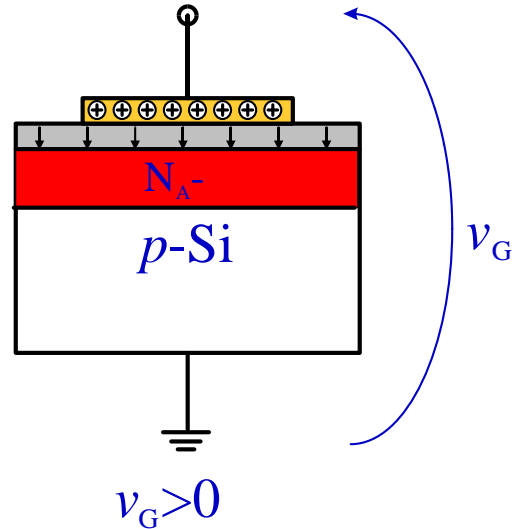
Che cosa succede applicando una tensione v_G ?

Accumulo di lacune



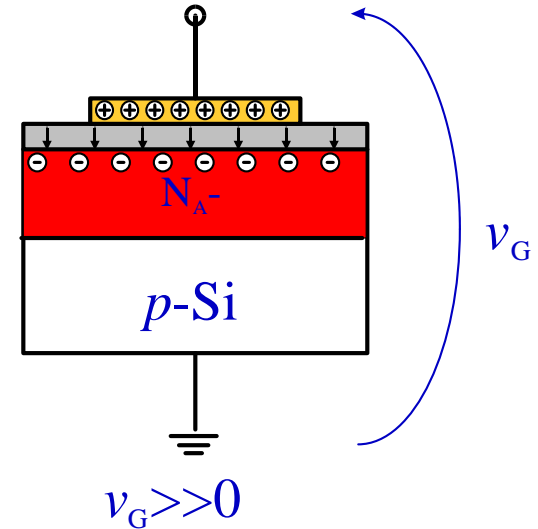
La carica **positiva** sull'armatura di Si è **mobile**, è costituita da lacune (=portatori maggioritari nel p-Si)

Svuotamento di lacune



La carica **negativa** sull'armatura di Si è **fissa**, è costituita dai droganti accettatori ionizzati (carica fissa)

Inversione



Aumentando ancora v_G la carica degli accettori non basta... si genera sull'armatura di Si anche un sottile strato (**canale**) di carica **negativa mobile: elettroni**



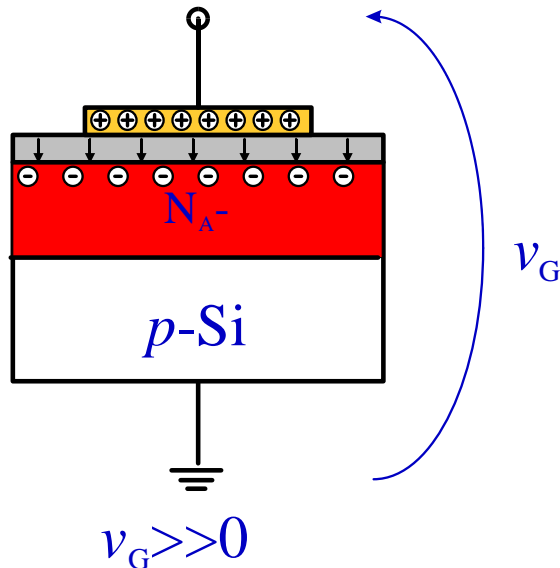
POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

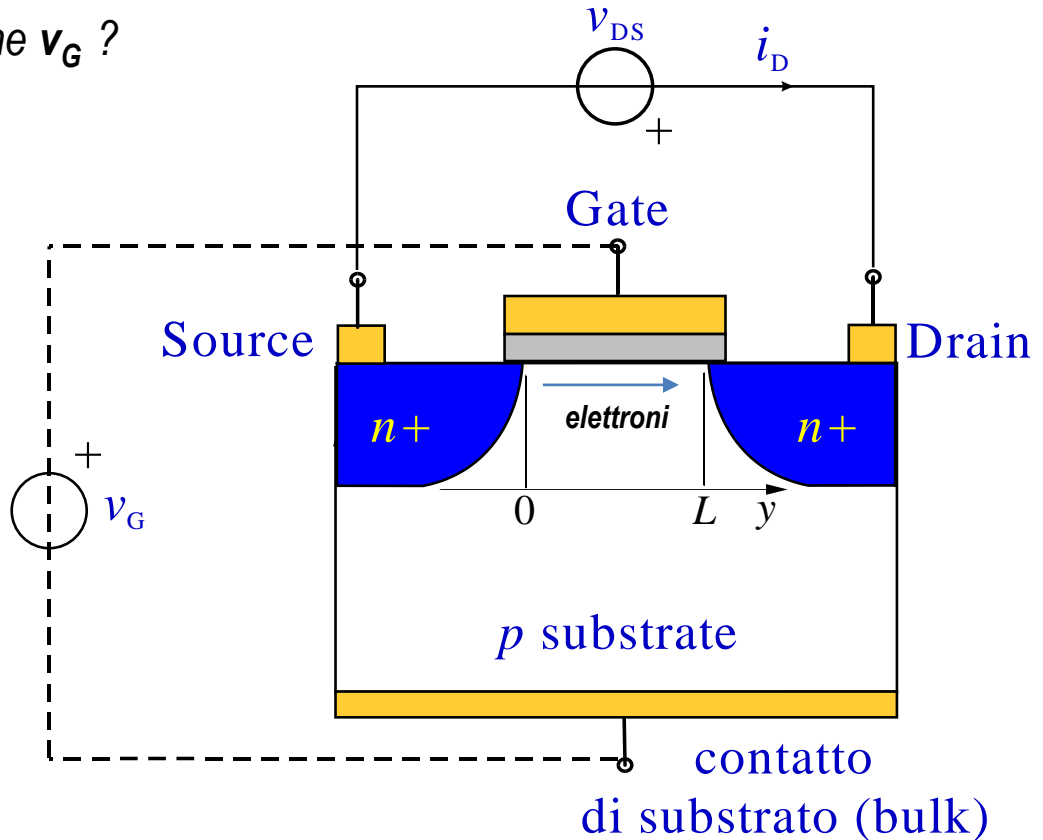
Transistore MOS a quattro terminali

cosa succede applicando una tensione v_G ?

Inversione



Aumentando ancora v_G oltre la **Tensione di Soglia V_{TH}** si aggiunge sull'armatura di Si anche uno strato (**canale**) di carica **negativa mobile: elettroni**



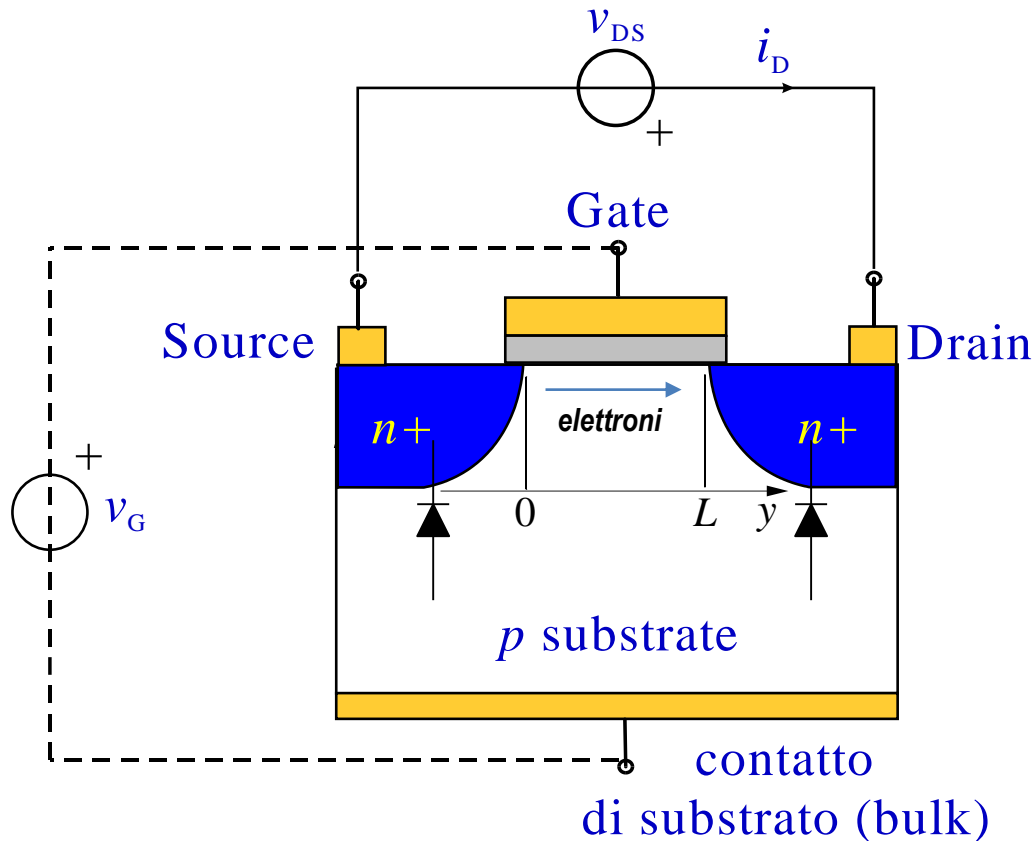
IDEA: sfruttare la carica mobile (=elettroni) del canale in inversione (che è controllata da v_G) per **controllare** la conduzione del semiconduttore in direzione parallela al gate



POLITECNICO
DI TORINO

DET
Department of Electronics and Telecommunications

Transistore MOS a quattro terminali



Si introducono regioni drogate $n+$ (=molto drogate n , quindi molto conduttive) per contattare il canale sui due lati (*source* e *drain*)

Queste regioni drogate $n+$ formano con il substrato delle giunzioni $pn+$ (diodi)

Se il potenziale del *drain* e del *source* è maggiore di quello del substrato, le giunzioni $pn+$ sono polarizzate inversamente \rightarrow le lacune non possono passare dal substrato p ai terminali di drain/source

Gli elettroni del canale in inversione possono passare ai terminali di drain/source dando luogo a passaggio di corrente nel circuito esterno per $v_{DS} \neq 0V$



IDEA: sfruttare la carica del canale in inversione (che è controllata da v_G) per **controllare** la conduzione del semiconduttore nella direzione parallela al *gate*

