



POLITECNICO  
DI TORINO

DET

Department of Electronics and Telecommunications

## Cenni di Fisica dei Dispositivi Elettronici a Semiconduttore (transistori MOS)

# Concetti base

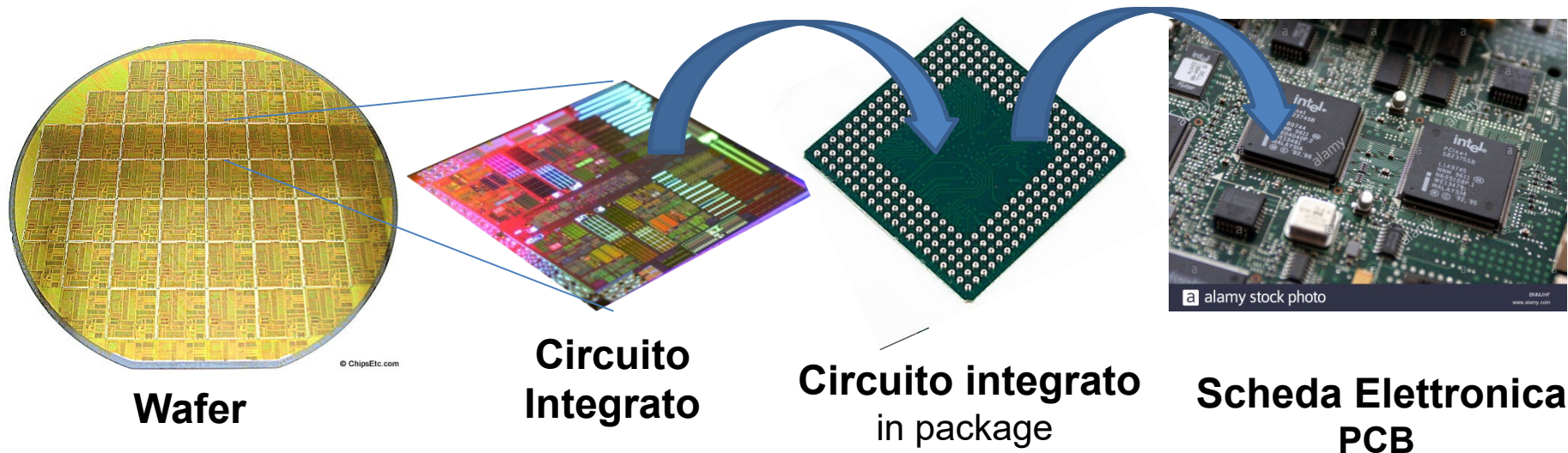
- **Fabbricazione dei circuiti integrati**
  - *Fotolitografia*
  - *Leggi di Moore*



# 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:  $>10^9$   
Frequenza di clock:  $>10$  GHz (dig. clk)

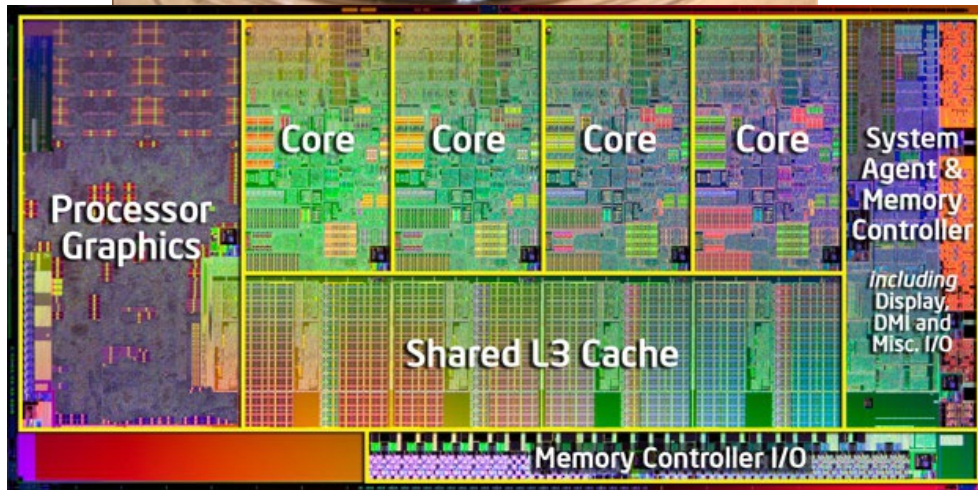
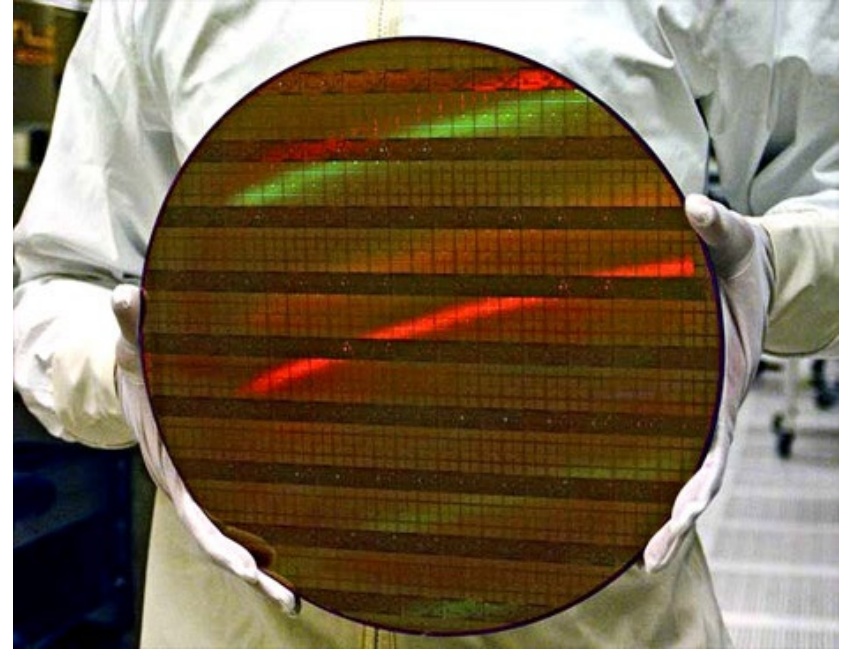
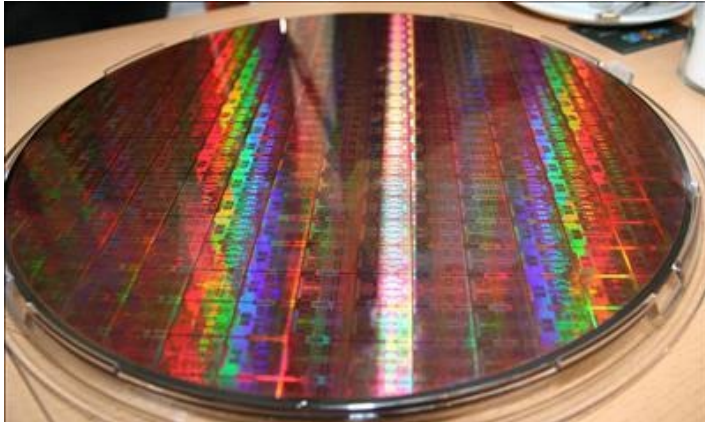


POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Circuiti integrati

- I *circuiti integrati* sono principalmente realizzati su **wafer di silicio**



INTEL Core i7



POLITECNICO  
DI TORINO

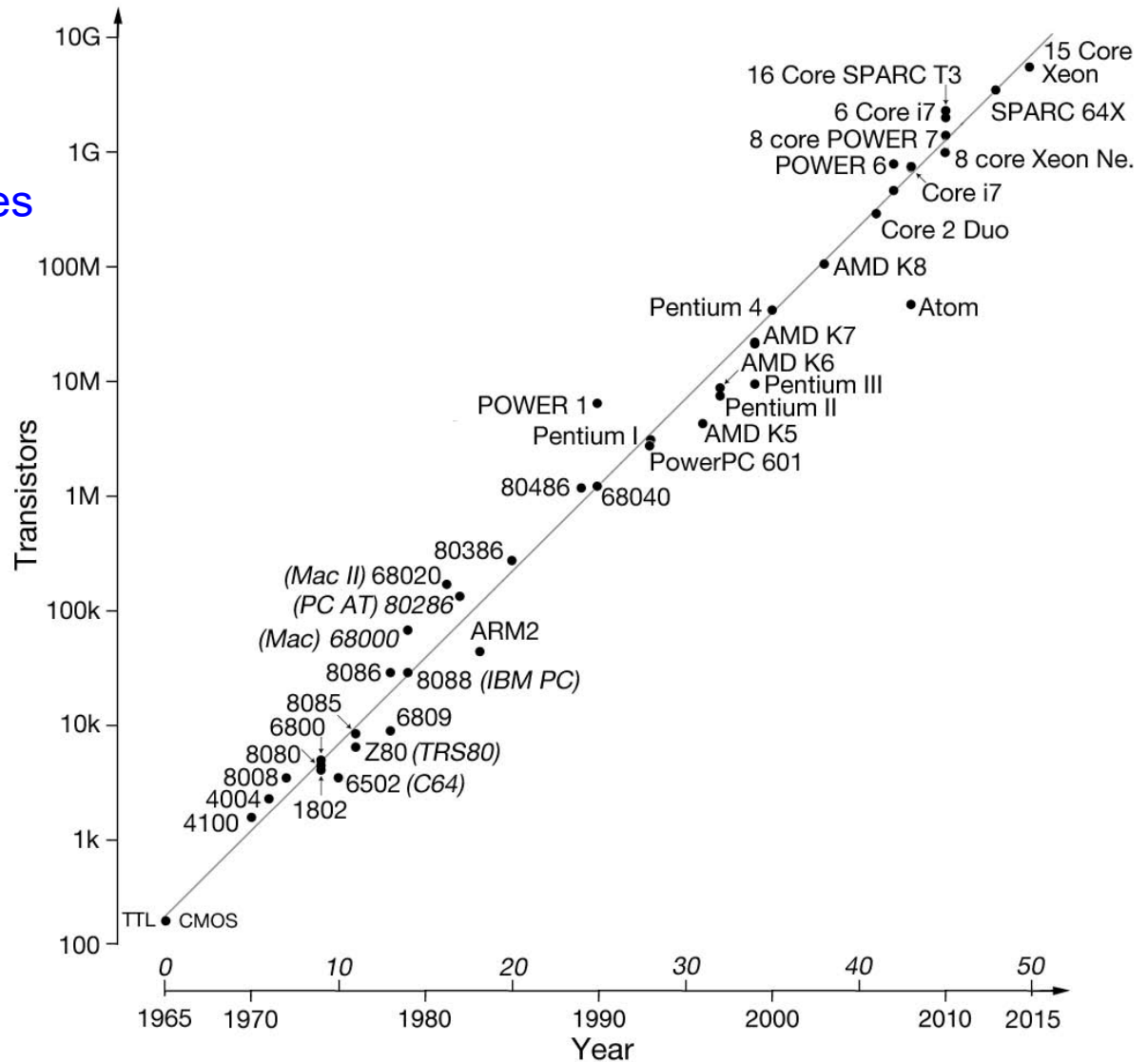
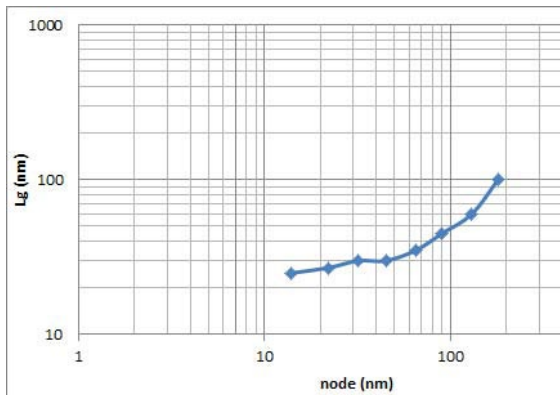
DET  
Department of Electronics and Telecommunications



# Moore's Law

The number of integrated components per IC doubles every 1.5/2 years

Si ottiene mediante lo **scalamento** delle dimensioni dei singoli dispositivi: 70% ogni 2/3 anni

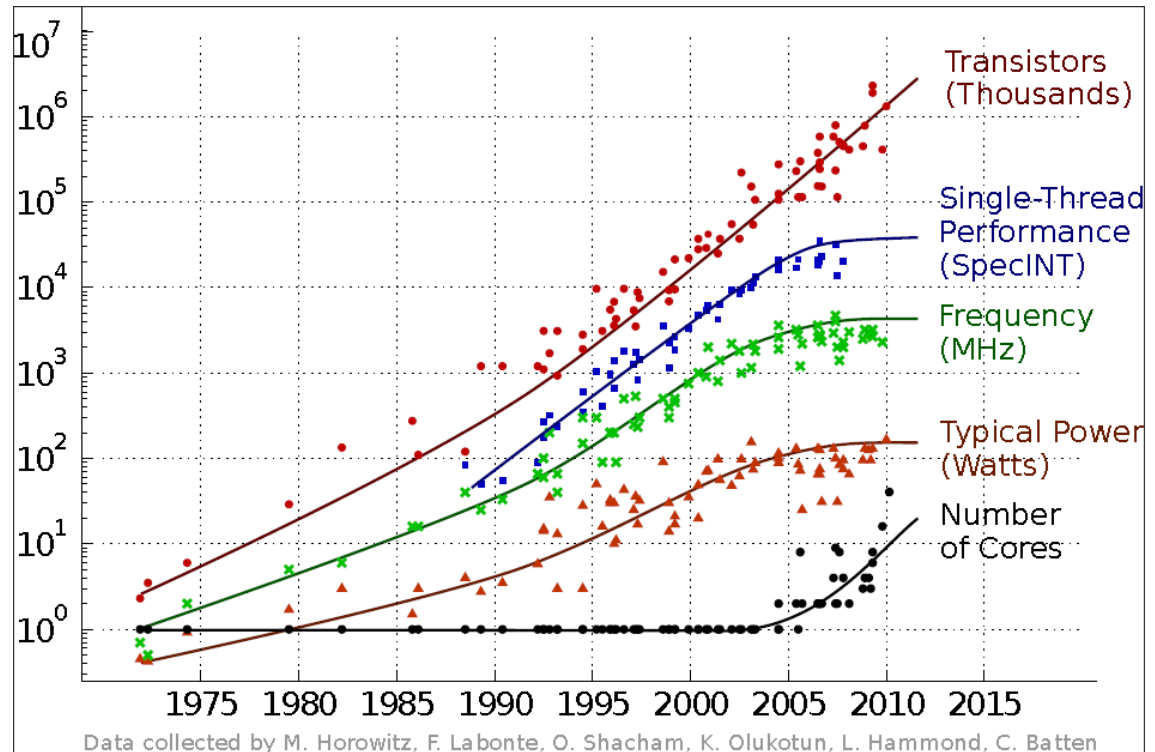


POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Limiti fisici: la fine della legge di Moore?

Lo **scalamento** da solo **non basta**: le dimensioni raggiunte (10 nm) rendono necessario considerare la **creazione di nuovi dispositivi**, anche sfruttando effetti di **natura quantistica** (tunnelling, spin, entanglement)



# Litografia

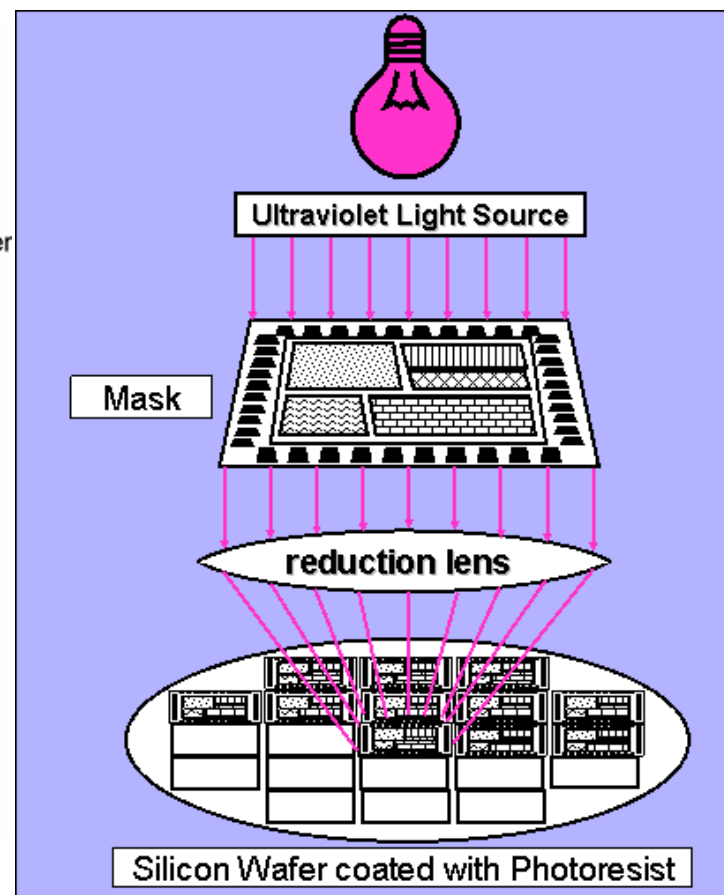
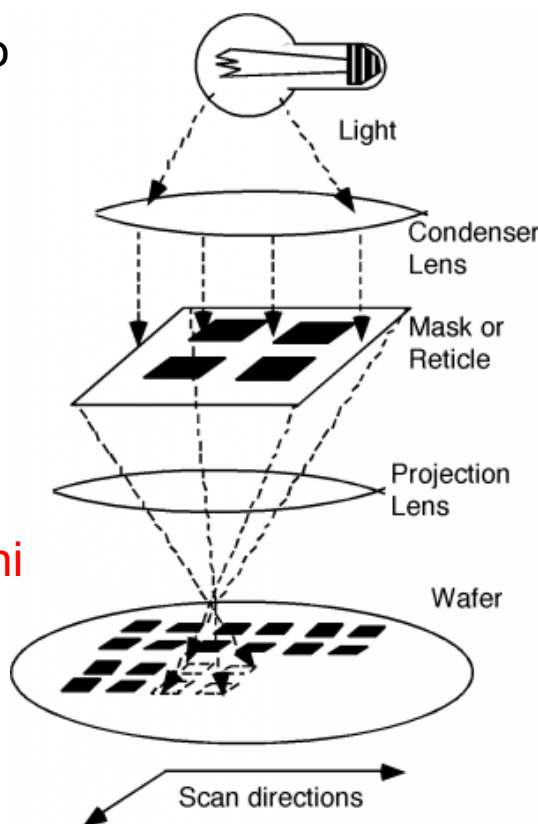
Il circuito integrato è una successione di “regioni” del wafer di silicio (**dispositivi**) interconnesse tra loro con piste metalliche e/o isolate tra loro con ossidi.

Le dimensioni nanometriche si ottengono utilizzando luce collimata

La successione di chiari e scuri permette di deporre/scavare il materiale in maniera selettiva

Il processo viene ripetuto per ottenere nelle posizioni volute:

- piste metalliche
- strati di ossido
- zone di silicio con proprietà fisiche diverse



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Concetti base

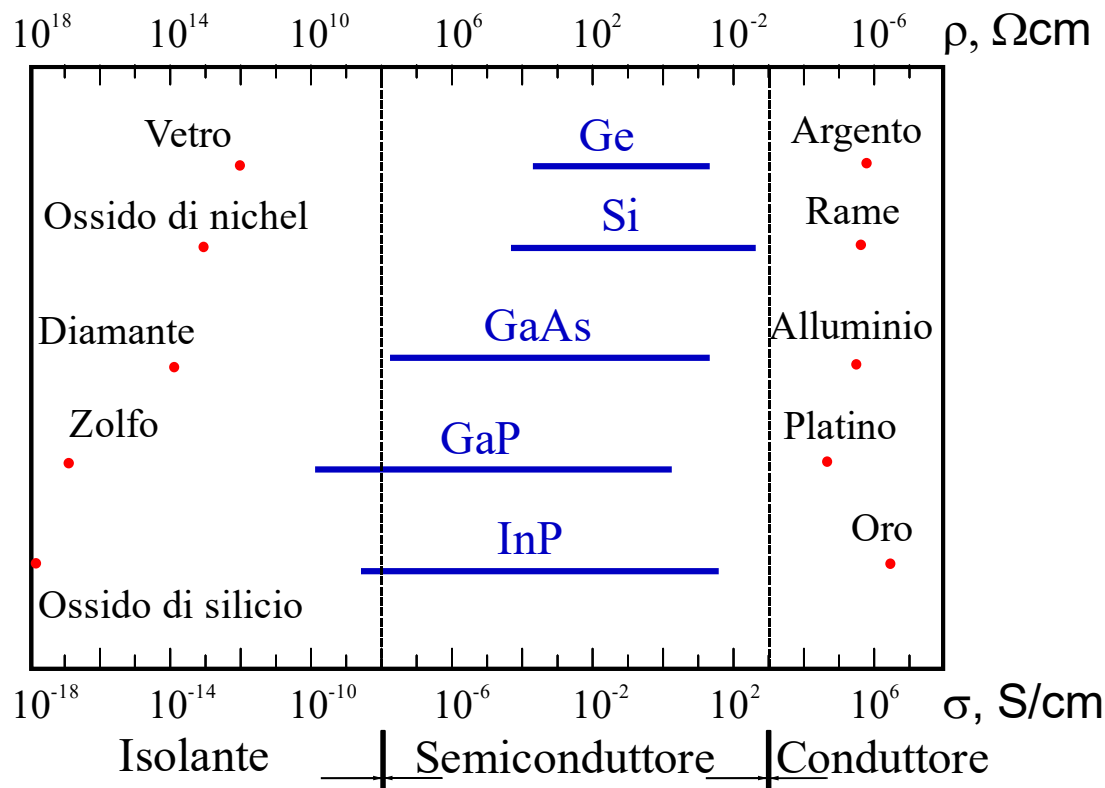
- **Semiconduttore**
  - ***Meccanismi di conduzione***
    - Elettroni e lacune
    - Banda di conduzione e di valenza
  - ***Semiconduttori drogati***
    - Drogaggio di tipo  $n$  e  $p$
  
- **Transistore MOS**
  - ***Struttura Metallo-Ossido-Semiconduttore***
    - Regione di inversione e canale
  - ***Transistore MOS***
    - 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*





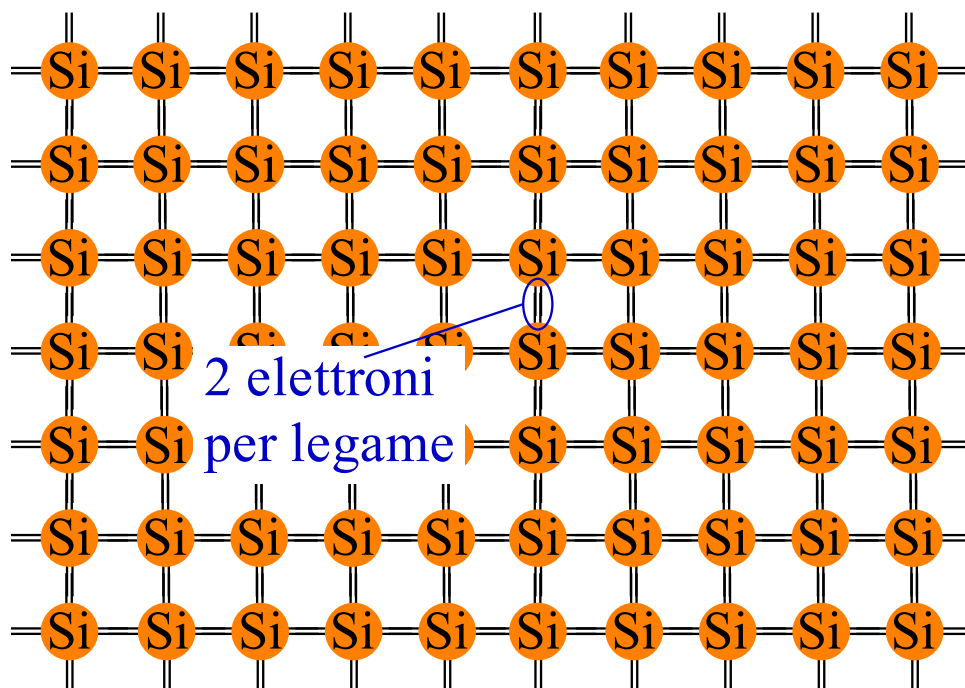
# Semiconduttori

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



# Semiconduttori

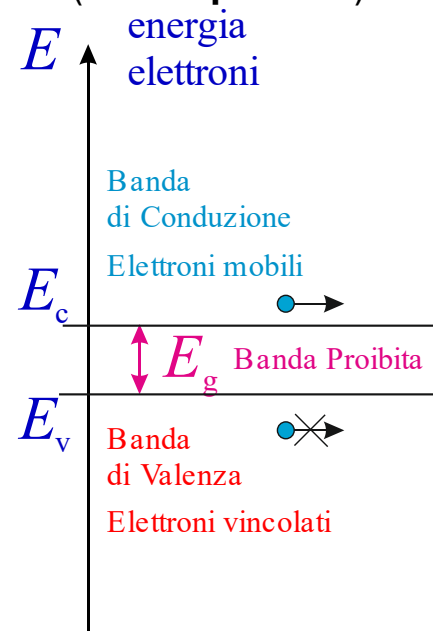
**Silicio (IV gruppo) :**  
quattro elettroni esterni



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**)



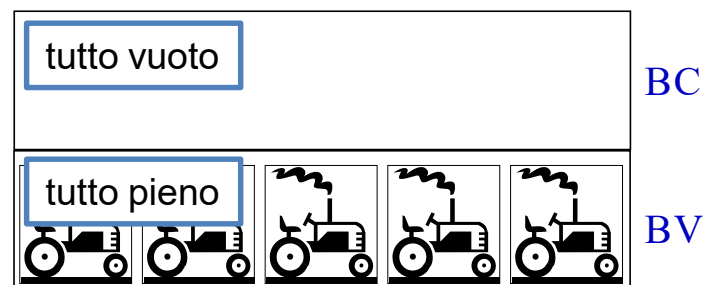
# Semiconduttori

Nei semiconduttori la conduzione è legata a due meccanismi distinti:

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

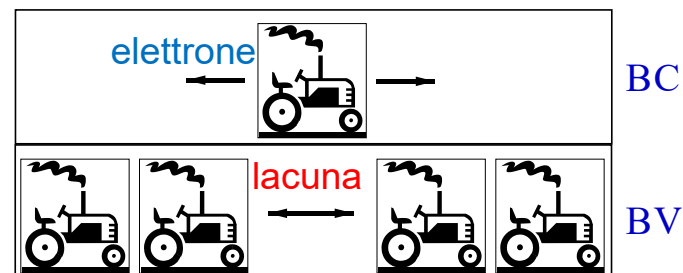
- spostamento di lacune (=mancanza di elettroni nei legami covalenti) in banda di valenza (**equivalgono a cariche positive mobili**)

Modello dell'autorimessa



No conduzione

Modello dell'autorimessa



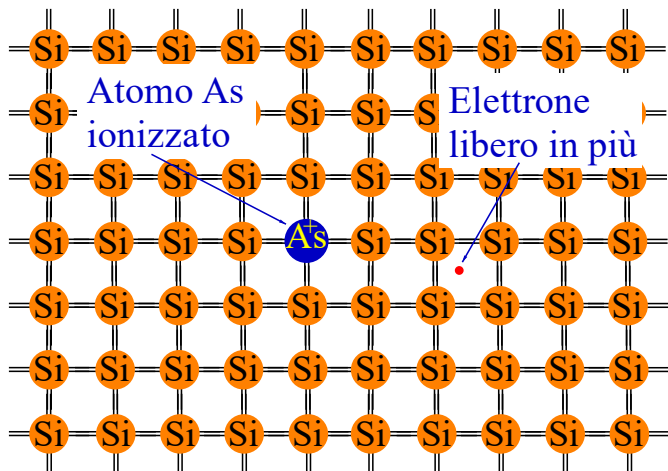
Sia gli elettroni sia le lacune, spostandosi danno luogo ad una corrente



# 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**

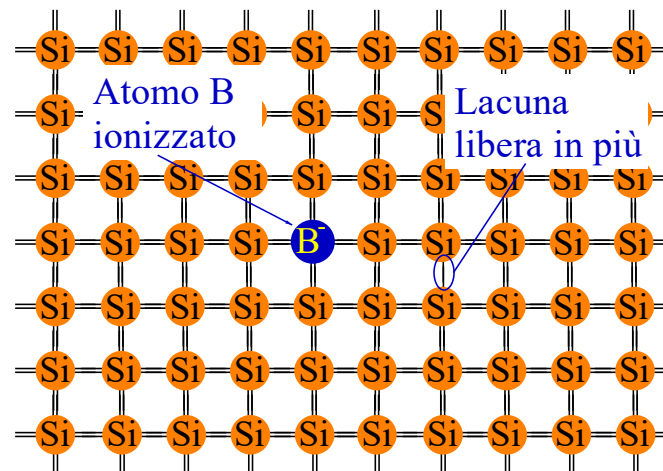
## Silicio drogato *n*



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*

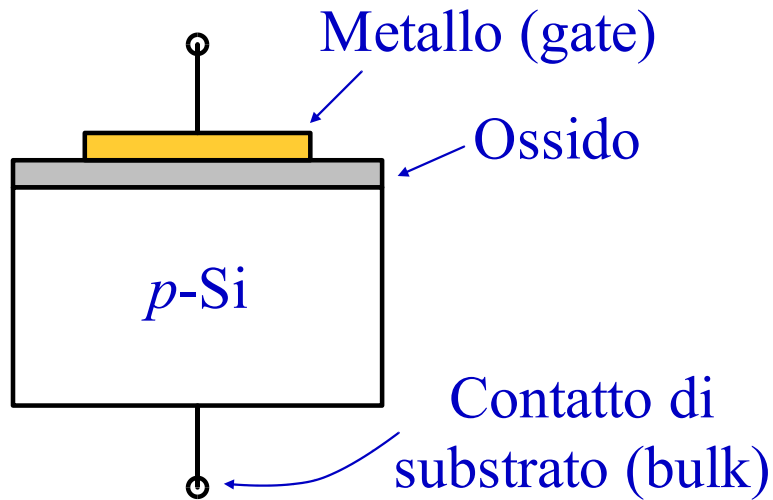


atomi **accettatori** (esempio: B per Si)  
1 elettrone in meno di Si nel guscio più esterno  
→ semiconduttore **drogato *p***

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



# 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  $\text{SiO}_2$
  - 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

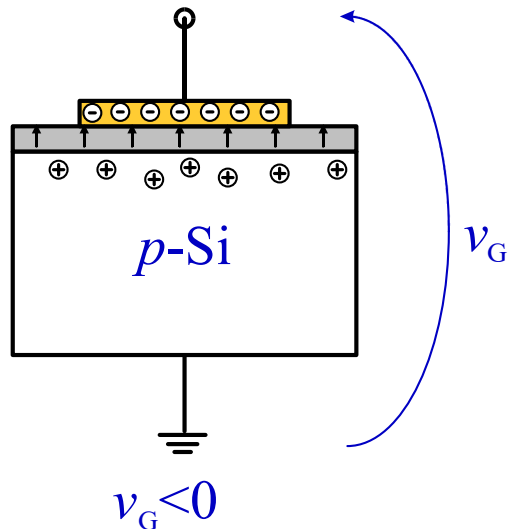




# Struttura Metallo-Ossido-Semiconduttore

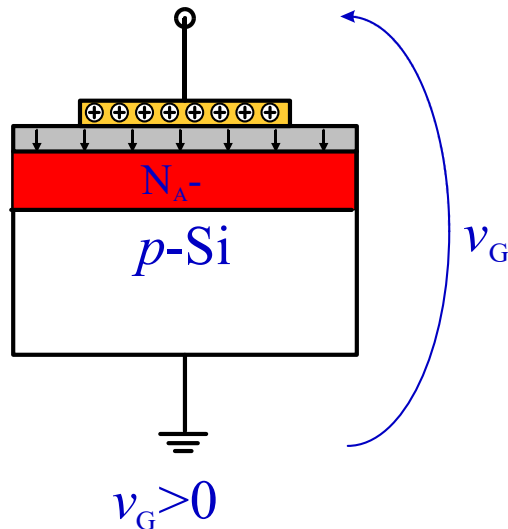
Che cosa succede applicando una tensione  $v_G$  ?

Accumulo di lacune



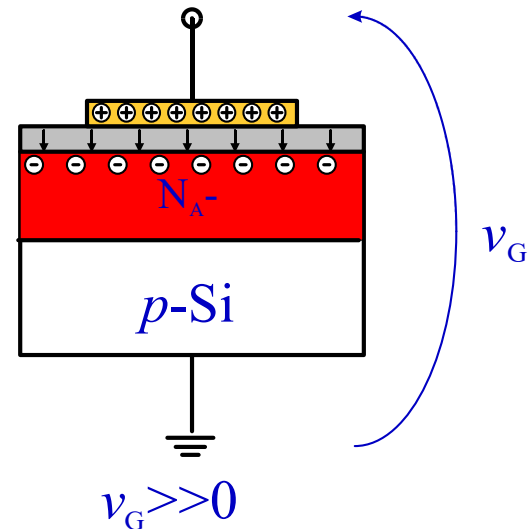
La carica **positiva** sull'armatura di Si è **mobile**, è costituita da lacune (=portatori maggioritari nel p-Si)

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**



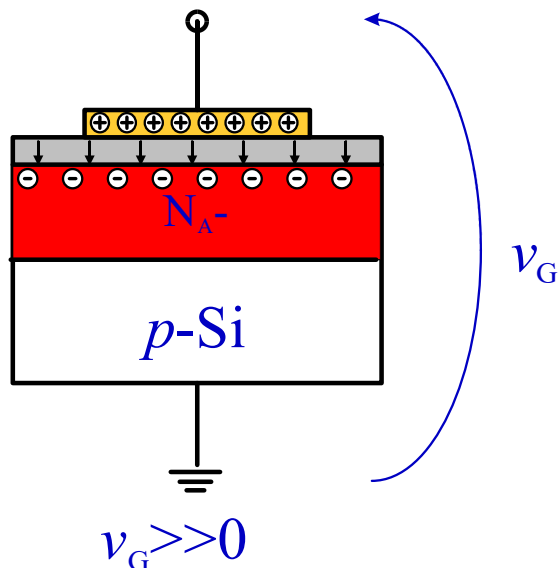
POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

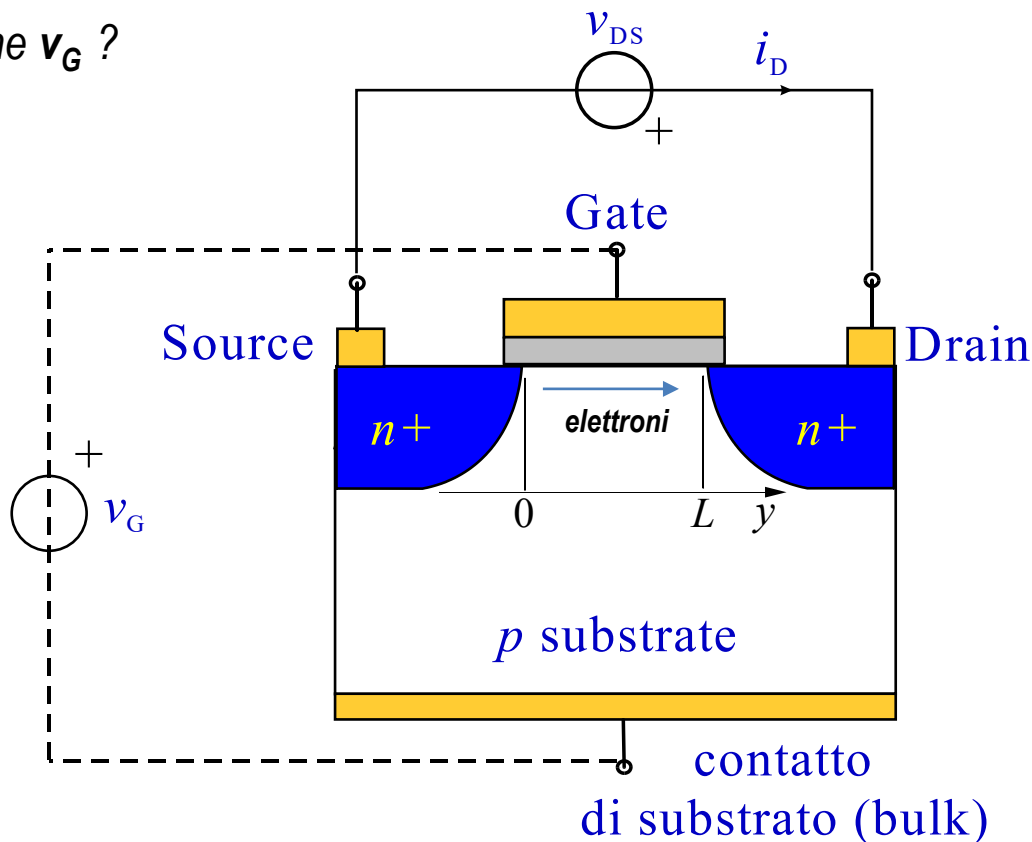
# Transistore MOS a quattro terminali

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**



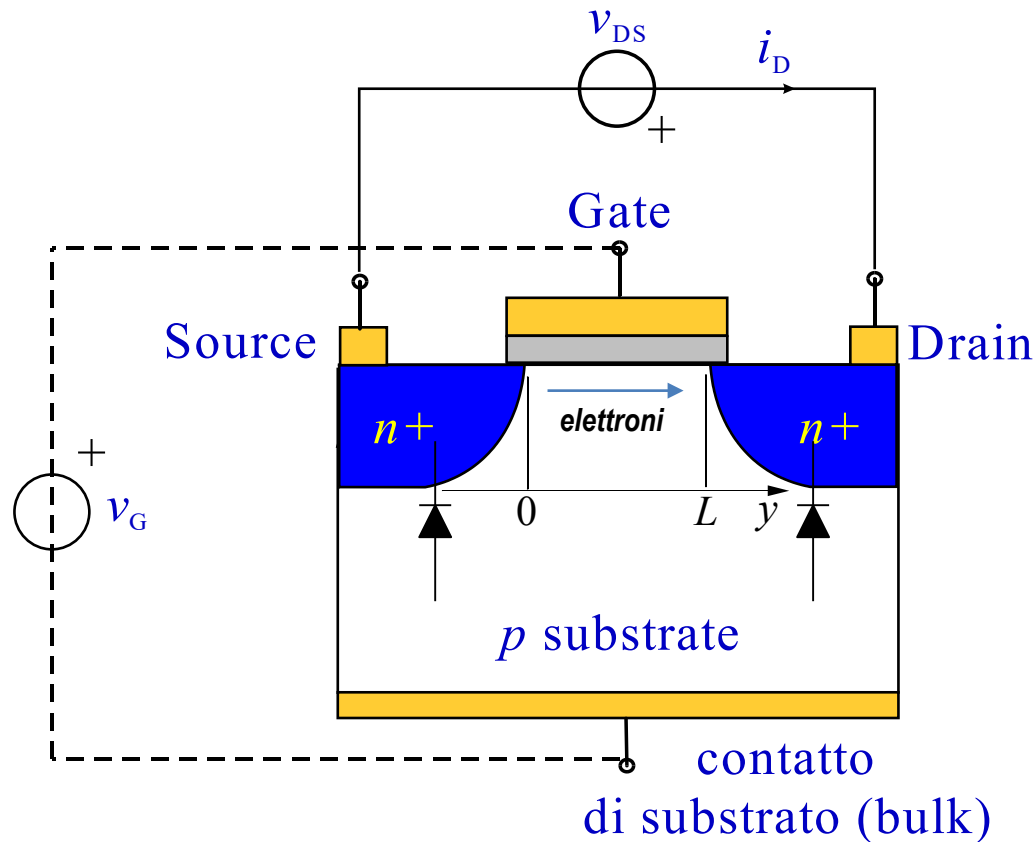
IDEA: sfruttare la carica mobile (=elettroni) del canale in inversione (che è controllata da  $v_G$ ) per **controllare** la conduzione del semiconduttore in direzione parallela al gate



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*

