Giunzione pn

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 27-2-2016)

Tipi di materiali solidi

- Un **cristallo** è un solido i cui atomi sono disposti in modo da costituire una struttura regolare periodica nelle tre dimensioni
  - **Monocristallo**: un solido costituito da un unico cristallo di dimensioni macroscopiche
  - **Solidi policristallini**: solidi formati da più cristalli, in genere di dimensioni microscopiche
- **Solidi amorfi**: solidi i cui atomi sono disposti in nodo disordinato

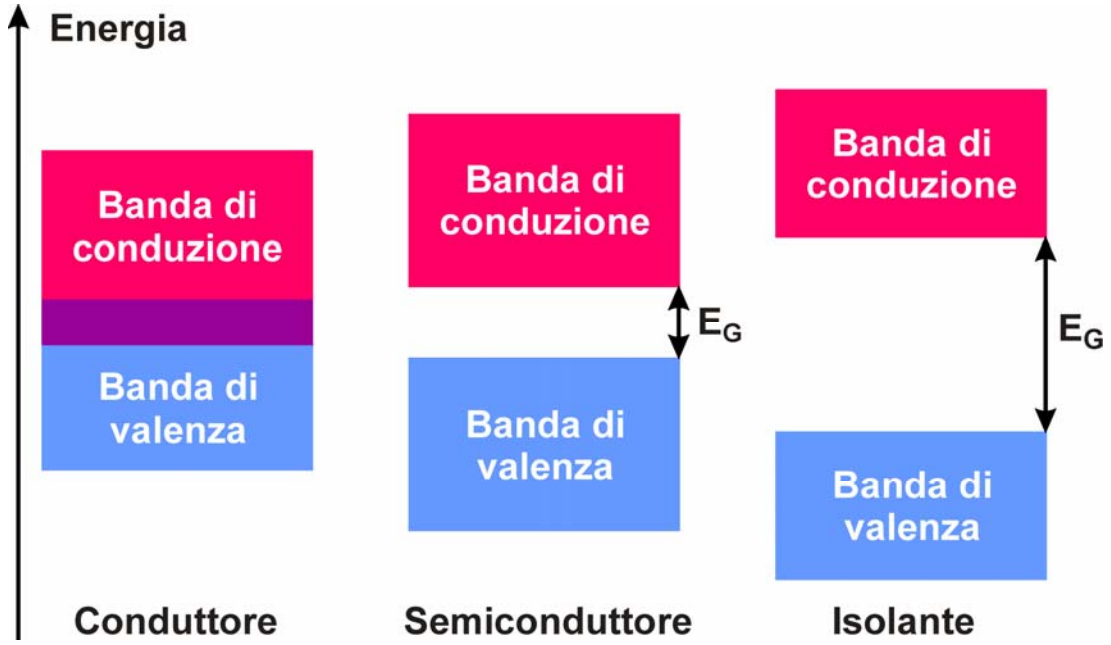
Bande di energia

- Quando gli atomi formano un cristallo, il moto degli elettroni dello strato più esterno è modificato rispetto a quanto avviene per un atomo isolato
  - gli elettroni non sono più legati a un singolo atomo ma sono condivisi tra più atomi
  - i livelli energetici permessi formano delle bande costituite da un numero molto elevato di livelli vicini tra loro
- Il moto degli elettroni degli strati più interni non è influenzato in modo apprezzabile dalla presenza degli altri atomi
  - si può assumere che il nucleo e gli elettroni degli strati più interni complessivamente costituiscano degli ioni positivi

Banda di conduzione e di valenza

- Ad ogni livello energetico permesso può corrispondere un numero finito di stati dinamici diversi
- In base al **principio di esclusione di Pauli** in ogni stato dinamico si può trovare al più un solo elettrone
- Alla temperatura T = 0 K gli elettroni occupano tutti gli stati permessi che corrispondono ai livelli energetici più bassi disponibili
- La banda di energia più elevata che in queste condizioni è occupata da elettroni è detta **banda di valenza**
- La prima banda al di sopra della banda di valenza è detta **banda di conduzione**

Banda di conduzione e di valenza



Conduttori e isolanti

- In un **conduttore** la banda di valenza e la banda di conduzione sono parzialmente sovrapposte
  - In presenza di un campo elettrico esterno gli elettroni possono acquisire energia e muoversi liberamente all'interno del cristallo
- In un **isolante** la banda di valenza e la banda di conduzione sono separate da una banda proibita (**gap**) di ampiezza E_G relativamente elevata (dell'ordine di alcuni elettronvolt, 1 eV = 1.6×10^{-19} J)
  - Un campo elettrico esterno non è in grado di trasferire gli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione
  - All'aumentare della temperatura, la probabilità che un elettrone acquisti un energia sufficiente a portarlo nella banda di conduzione è trascurabile

Semiconduttori

- In un **semiconduttore** l'ampiezza della banda proibita è relativamente piccola (dell'ordine di 1 eV)
  - Es: a 0 K per il silicio E_G = 1.17 eV, per il germanio E_G = 0.743 eV
- Un campo elettrico esterno non è in grado di trasferire elettroni nella banda di conduzione,
  - T = 0 K il materiale si comporta come un isolante
- Per T > 0 K un certo numero di elettroni (crescente con T) può acquisire energia sufficiente per trasferirsi nella banda di conduzione
  - In presenza di un campo elettrico si può avere una corrente
  - La conducibilità risulta inferiore a quella dei conduttori e aumenta all'aumentare della temperatura
- Come si vedrà in seguito, il comportamento di un semiconduttore può essere sensibilmente influenzato dalla presenza di impurità nel cristallo
- Un semiconduttore sufficientemente puro da non risentire di questi effetti è detto **intrinseco**

Materiali semiconduttori

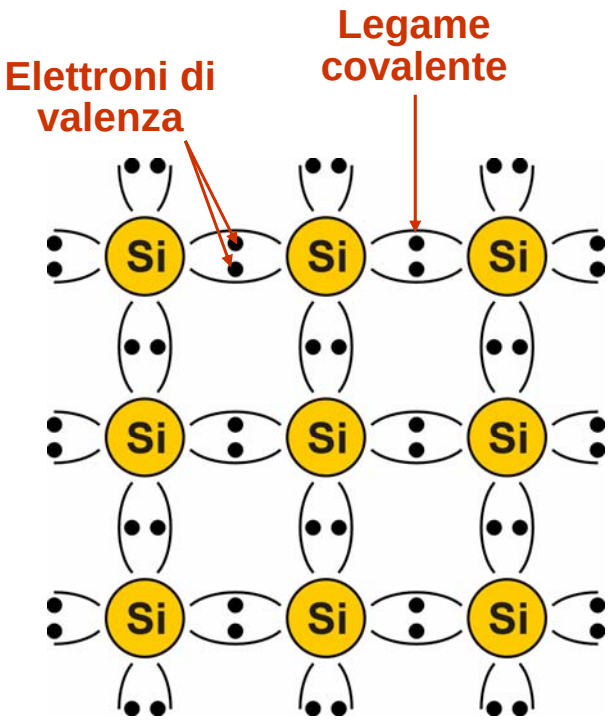
- Oltre agli elementi semiconduttori (silicio e germanio) esistono anche semiconduttori composti
- Questi ultimi, in prevalenza, sono formati da combinazioni di elementi dei gruppi IIIA e VA (es. GaAs) o dei gruppi IIB e VIA (es. CdS)
- I semiconduttori composti sono impiegati in applicazioni particolari (es. dispositivi optoelettronici e dispositivi per alta frequenza)
- Il germanio è stato utilizzato per realizzare i primi transistor

	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 B	6 C	7 N	8 O
IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

- Attualmente il materiale più diffuso, su cui si basa quasi interamente la produzione dei circuiti integrati, è il silicio
- Per questo motivo in seguito si farà riferimento solo al silicio

Silicio intrinseco

- Un atomo di silicio ha 4 elettroni nello strato più esterno (**elettroni di valenza**)
- In un cristallo di silicio ciascuno di questi elettroni viene condiviso con uno degli atomi più vicini
- Una coppia di elettroni condivisi dà origine a un **legame covalente**
- In questo modo per ogni atomo viene riempito completamente lo strato più esterno, che può contenere 8 elettroni



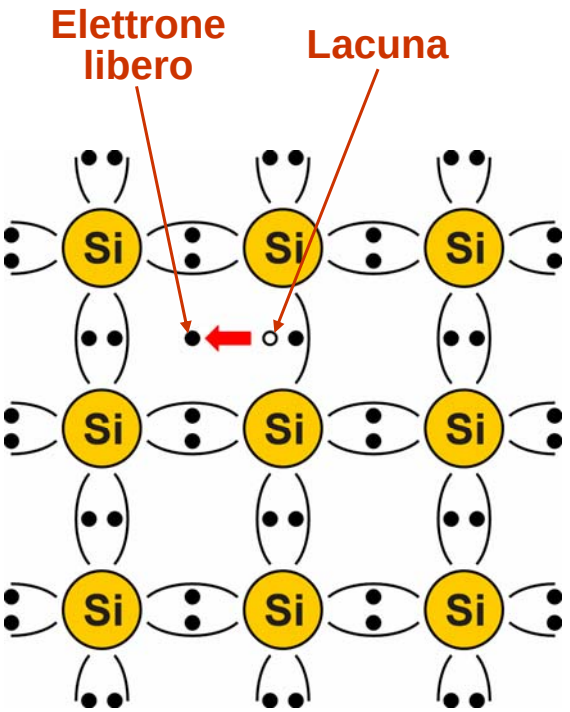
Elettroni e lacune

- Per T = 0 K tutti gli elettroni di valenza sono legati a coppie di atomi

➡ Non ci sono elettroni disponibili per dare luogo a correnti elettriche

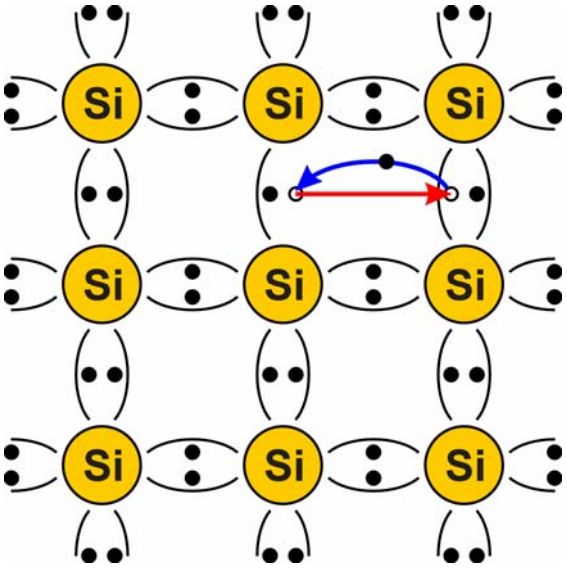
- All'aumentare di T un certo numero di elettroni può acquistare l'energia sufficiente per rompere il legame e quindi può muoversi liberamente nel cristallo
- In questo modo un legame rimane incompleto

➡ Si forma una **lacuna**



Movimento di una lacuna

- In presenza di un legame incompleto è possibile che un elettrone di un atomo vicino vada ad occupare la lacuna
- In questo modo viene prodotta una nuova lacuna nell'atomo da cui proviene l'elettrone
- Successivi spostamenti di elettroni di valenza producono un movimento della lacuna attraverso il cristallo
- La lacuna si comporta come una particella dotata di carica positiva, uguale in valore assoluto a quella dell'elettrone, libera di muoversi attraverso il cristallo



Generazioni e ricombinazioni

- In un cristallo di silicio, per effetto dell'agitazione termica si ha una continua **generazione** di coppie elettrone-lacuna
  - Il tasso di generazione è funzione della temperatura
- All'aumentare delle concentrazioni di elettroni liberi e lacune aumenta la probabilità che un elettrone libero vada ad occupare una lacuna
- Questo processo è detto **ricombinazione** e determina la scomparsa di un elettrone libero e di una lacuna
  - Il tasso di ricombinazione è funzione della temperatura e della concentrazione di elettroni e lacune
- In condizioni di equilibrio termico le generazioni e le ricombinazioni si bilanciano
- ➡ La concentrazione di elettroni (liberi), n, e la concentrazione di lacune, p, sono uguali tra loro e costanti e dipendono solo dalla temperatura

$$p = n = n_i$$

n_i = **concentrazione intrinseca**

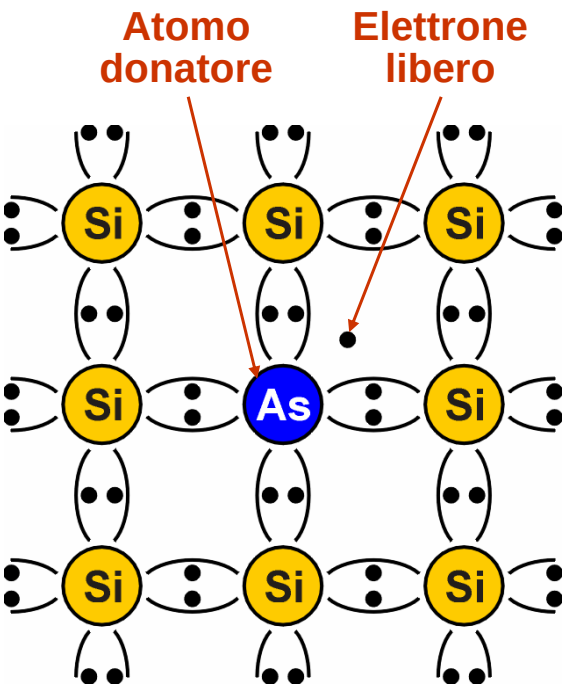
Per il silicio, per $T = 300$ K si ha $n_i \approx 1.45 \times 10^{10}$ cm^{-3}

Accettori e donatori

- Le concentrazioni degli elettroni e delle lacune possono essere modificate con l'introduzione nel cristallo di impurità sostituzionali (cioè atomi di elementi diversi che si sostituiscono ad alcuni degli atomi di silicio)
  - Questo procedimento è detto **drogaggio**
- Ci sono due categorie di elementi droganti
  - Gli elementi del gruppo IIIA (boro, alluminio, indio, gallio, ...), che hanno 3 elettroni di valenza, sono detti **accettori** e determinano un incremento della concentrazione di lacune
    - Il silicio drogato con elementi accettori è detto di **tipo p**
  - Gli elementi del gruppo VA (fosforo, arsenico, antimonio ...), che hanno 5 elettroni di valenza, sono detti **donatori** e determinano un incremento della concentrazione di elettroni
    - Il silicio drogato con elementi donatori è detto di **tipo n**

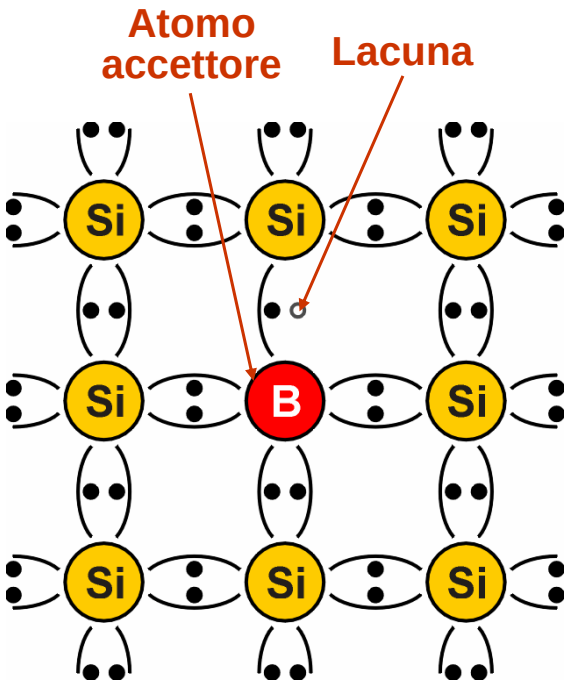
Silicio di tipo n

- Alcuni atomi di silicio sono sostituiti da atomi di un elemento pentavalente (es. arsenico)
- 4 degli elettroni di valenza degli atomi donatori formano legami covalenti
- Il quinto elettrone risulta debolmente legato all'atomo donatore
- ➡ Alle temperature ordinarie può acquistare energia sufficiente a renderlo libero
- ➡ Incremento del numero di elettroni liberi senza generazione di lacune
- ➡ L'atomo donatore cede un elettrone, quindi diviene uno ione positivo



Silicio di tipo p

- Alcuni atomi di silicio sono sostituiti da atomi di un elemento trivalente (es. boro)
- I tre elettroni di valenza degli atomi accettori formano altrettanti legami covalenti
- Manca un elettrone per completare il quarto legame
- ➡ Si ha una lacuna che può essere occupata da un elettrone di valenza di un atomo vicino
- ➡ Incremento del numero di lacune senza generazione di elettroni liberi
- ➡ L'atomo accettore acquista un elettrone, quindi diviene uno ione negativo



Concentrazione delle cariche

- Affinché i droganti caratterizzino il cristallo come di tipo p o di tipo n, occorre che la loro concentrazione sia grande rispetto alla concentrazione intrinseca n_i
  - ➡ Le concentrazioni dei droganti non sono mai inferiori a 10^{13}-10^{14} cm^{-3}
- Non è possibile introdurre nel silicio impurità sostituzionali con concentrazioni superiori a 10^{19} -10^{20} cm^{-3} (limite di solubilità)
  - ➡ Questo limite rappresenta il valore massimo che possono assumere le concentrazioni dei droganti
- In un cristallo di tipo n, con valori della concentrazione dei donatori N_D compresi in questo intervallo, si ha
  $n \approx N_D$
- Analogamente in un cristallo di tipo p, se la concentrazione degli accettori è N_A, risulta
  $p \approx N_A$

Concentrazione delle cariche

- Si può dimostrare che in un cristallo drogato il prodotto delle concentrazioni degli elettroni e delle lacune non dipende dalle concentrazioni dei droganti, ma assume sempre lo stesso valore che si ha nel silicio intrinseco (**legge dell'azione di massa**)

$$pn = n_i^2$$

- Di conseguenza in un cristallo n la concentrazione delle lacune

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

quindi risulta molto minore della concentrazione intrinseca

- Analogamente, in un cristallo p, la concentrazione di elettroni è

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

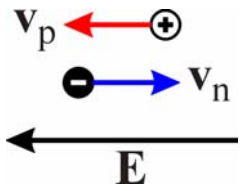
➡ In un cristallo n gli elettroni sono detti **cariche maggioritarie** mentre le lacune sono dette **cariche minoritarie**, in un cristallo p le lacune sono le cariche maggioritarie e gli elettroni le cariche minoritarie

Corrente di deriva

- In presenza di un campo elettrico esterno $\mathbf{E}$, le lacune sono accelerate nella direzione del campo e gli elettroni nella direzione opposta
- Dato che le cariche mobili sono soggette ad un'azione frenante dovuta alle interazioni con il reticolo cristallino, le loro velocità risultano proporzionali al campo elettrico
- Quindi le velocità degli elettroni e delle lacune sono date, rispettivamente dalle relazioni

$$\mathbf{v}_p = \mu_p \mathbf{E} \qquad \mu_p = \textbf{mobilità delle lacune}$$

$$\mathbf{v}_n = -\mu_n \mathbf{E} \qquad \mu_n = \textbf{mobilità degli elettroni}$$



- Le mobilità diminuiscono all'aumentare della temperatura e della concentrazione dei droganti
- In pratica, per il silicio, si può assumere che il loro valore coincida con quello del semiconduttore intrinseco fino a concentrazione dell'ordine di $10^{15}\ \mathrm{cm}^{-3}$

Corrente di deriva

- Le lacune e gli elettroni, per effetto del campo elettrico esterno, danno luogo ad una corrente (**corrente di deriva**) la cui densità è

  $$\mathbf{J} = q(p\mu_p + n\mu_n)\mathbf{E}$$

  dove q è la carica dell'elettrone ($q = 1.602\times10^{-19}$ C)

- Dato che la densità di corrente è legata al campo elettrico dalla relazione

  $$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$$

  si riconosce che l'espressione della conducibilità è

  $$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n)$$

Esempio

- Per il silicio intrinseco alla temperatura di 300 K si ha

  $$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$
  $$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$
  $$n = p = n_i = 1.45\times10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

  ➡ quindi

  $$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n) \approx 4.3\times10^{-6} \ (\Omega\cdot\text{cm})^{-1} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \approx 2.4\times10^{5} \ \Omega\cdot\text{cm}$$

- Per il silicio tipo n con $N_D = 10^{15}$ cm^{-3} a 300 K (assumendo che le mobilità siano invariate rispetto al silicio intrinseco) si ha

  $$n \approx N_D = 10^{15}$$
  $$p \approx n_i^2/N_D = 2\times10^{5} \text{ cm}^{-3}$$

  ➡ quindi

  $$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n) \approx 0.22 \ (\Omega\cdot\text{cm})^{-1} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \approx 4.6 \ \Omega\cdot\text{cm}$$

Corrente di diffusione

- Se nel cristallo la densità degli elettroni o delle lacune non è costante, l'agitazione termica determina un movimento di cariche dalle regioni a concentrazione maggiore verso quelle a concentrazione minore
- Si ha quindi una corrente (**corrente di diffusione**) la cui densità è proporzionale al gradiente della concentrazione delle cariche
- Supponendo, per semplicità, che le concentrazioni degli elettroni o delle lacune varino solo nella direzione x, si ha

- Nel caso degli elettroni la densità di corrente è diretta in senso concorde con il gradiente di concentrazione, nel caso delle lacune in senso opposto

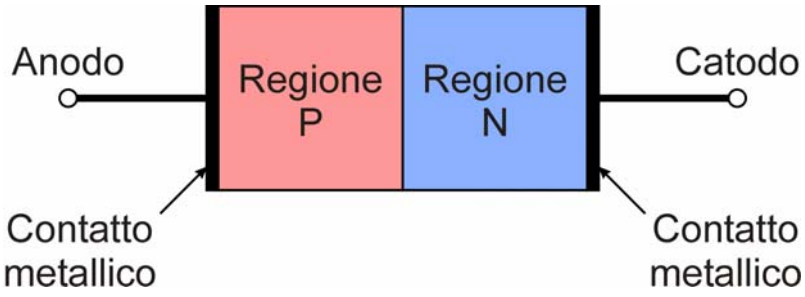
Corrente di diffusione

- Quindi le densità di corrente di diffusione dovute agli elettroni e alle lacune possono essere espresse nella forma

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \qquad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

- I coefficienti D_n e D_p sono detti **costanti di diffusione**
- A $300\ \mathrm{K}$ si ha
  - $D_n \approx 35\ \mathrm{cm^2/s}$
  - $D_p \approx 12\ \mathrm{cm^2/s}$

Giunzione pn



- Una **giunzione pn** viene realizzata creando all'interno di un cristallo semiconduttore una regione drogata di tipo p e una di tipo n
- Alle estremità delle regioni p ed n vengono collegati due contatti metallici
- Il terminale collegato alla regione p è detto **anodo**, il terminale collegato alla regione n è detto **catodo**

Giunzione pn in equilibrio

- Si può immaginare che la giunzione pn venga realizzata ponendo a contatto un cristallo p con uno n
- Dato che nelle due regioni le densità dei portatori di carica sono diverse nasce una **corrente di diffusione** I_D costituita da
  - lacune che si diffondono dalla regione p alla regione n
  - elettroni che si diffondono dalla regione n alla regione p
- Le lacune transitate nella regione n si ricombinano rapidamente con gli elettroni che in questa regione rappresentano le cariche maggioritarie
- In modo analogo, gli elettroni che attraversano la giunzione si ricombinano con le lacune della regione p
- Queste ricombinazioni determinano una diminuzione delle cariche libere in una piccola regione in prossimità della superficie di giunzione (**regione svuotata**)

Giunzione pn in equilibrio

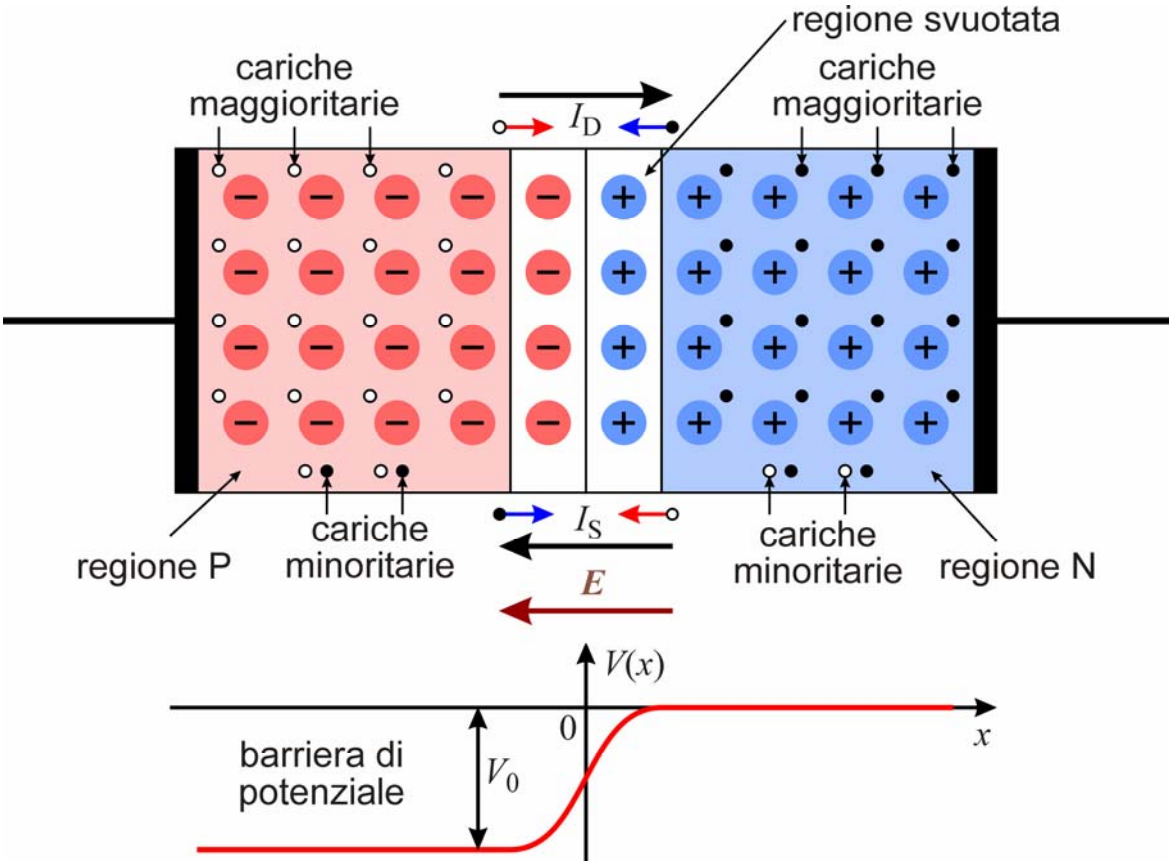
- Nella regione svuotata sono presenti cariche fisse non bilanciate da cariche mobili
  - atomi donatori che hanno ceduto un elettrone
  - atomi accettori che hanno acquistato un elettrone

  (Per questo la regione svuotata è detta anche **regione di carica spaziale)**
- Queste cariche danno origine ad un campo elettrico $\mathbf{E}$ che si oppone alla corrente di diffusione
- Tra le sezioni alle estremità della regione svuotata di ha una differenza di potenziale V_0 (**barriera di potenziale**) che ostacola il moto delle lacune verso la regione n e degli elettroni verso la regione p
- V_0 dipende dalla concentrazione dei droganti e dalla temperatura
- Per il silicio a temperatura ambiente i valori tipici di V_0 sono di circa 0.6 - 0.9 V

Giunzione pn in equilibrio

- Nelle regioni p e n sono presenti anche cariche minoritarie prodotte per generazione termica
  - elettroni nella regione p
  - lacune nella regione n
- Il verso del campo elettrico è tale da spingere le cariche minoritarie ad attraversare la giunzione dando origine ad una corrente di deriva I_S diretta in senso opposto alla corrente di diffusione
- In condizioni di equilibrio le correnti I_D e I_S si bilanciano e quindi la corrente totale attraverso la giunzione è nulla

Giunzione pn in equilibrio



Contatti ohmici

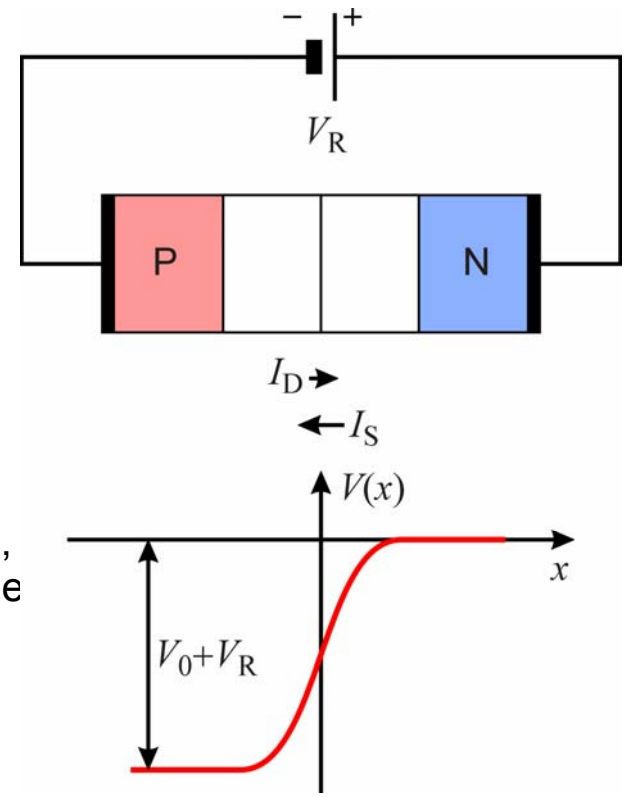
- Per poter inserire la giunzione pn in un circuito, le estremità del cristallo vengono connesse a conduttori metallici, formando due giunzioni metallo-semiconduttore
- In corrispondenza di queste giunzioni nascono delle differenze di potenziale (**potenziali di contatto**) tali da compensare la tensione V_0
- Quindi la differenza di potenziale a vuoto tra i due terminali è nulla (Se la tensione fosse diversa da zero, collegando un carico si avrebbe una corrente e quindi si creerebbe energia dal nulla)
- Le giunzioni metallo semiconduttore possono dare luogo a comportamenti diversi a seconda di come sono realizzate
- In seguito si assumerà che le giunzioni siano realizzate in modo da comportarsi come **contatti ohmici**
- Questo significa che i loro potenziali di contatto si mantengono costanti, indipendentemente dal valore e dal verso della corrente che li attraversa (ciò avviene se in corrispondenza della giunzione il semiconduttore è fortemente drogato)

Giunzione polarizzata

- Polarizzare la giunzione significa applicare una differenza di potenziale ai terminali
- Quando il potenziale applicato al lato p (anodo) è minore di quello applicato al lato n (catodo) si dice che la giunzione è polarizzata inversamente
  - In questo caso la differenza di potenziale applicata ha polarità concorde con la barriera di potenziale
- Quando il potenziale applicato al lato p è maggiore di quello applicato al lato n si dice che la giunzione è polarizzata direttamente
  - In questo caso la differenza di potenziale applicata ha polarità discorde con la barriera di potenziale
- Il comportamento della giunzione nelle due condizioni di polarizzazione risulta notevolmente diverso

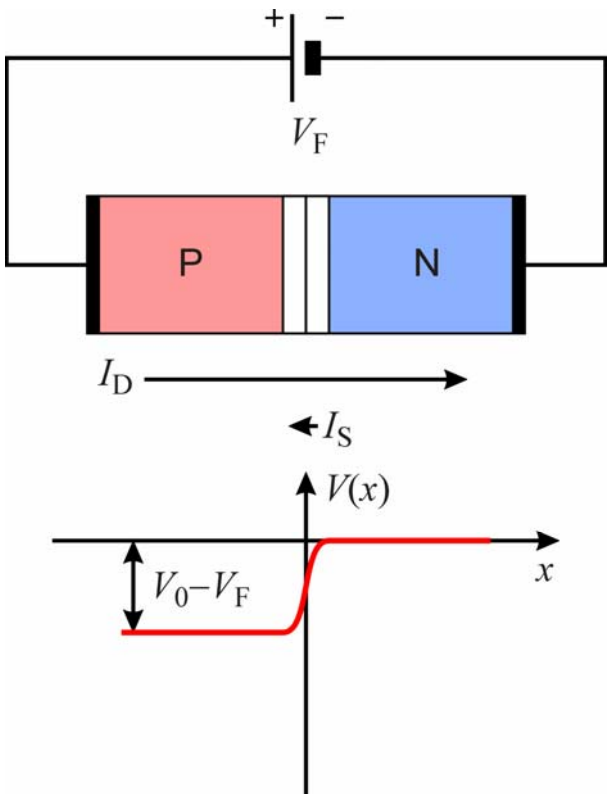
Giunzione polarizzata inversamente

- La tensione di polarizzazione V_R richiama le lacune verso il terminale negativo gli elettroni verso il positivo
- La regione svuotata si allarga
- Aumenta il numero di cariche fisse non neutralizzate e, di conseguenza, anche l'ampiezza della barriera di potenziale, che diviene pari a V_0+V_R
- All'aumentare di V_R la corrente di diffusione si riduce fino ad annullarsi
- Rimane la sola corrente di deriva che, dipendendo dalla concentrazione delle cariche minoritarie, è molto piccola e praticamene indipendente da V_R (mentre varia sensibilmente con la temperatura)



Giunzione polarizzata direttamente

- La tensione di polarizzazione V_F determina una riduzione della barriera di potenziale
- A questo corrisponde una riduzione della larghezza della regione svuotata e quindi del numero di cariche fisse non compensate
- Aumentando V_F, la riduzione della barriera di potenziale consente ad un numero sempre maggiore di elettroni e di lacune di attraversare la giunzione per diffusione
- La corrente di diffusione I_D diviene rapidamente maggiore di molti ordini di grandezza rispetto alla corrente di deriva I_S



Giunzione polarizzata direttamente

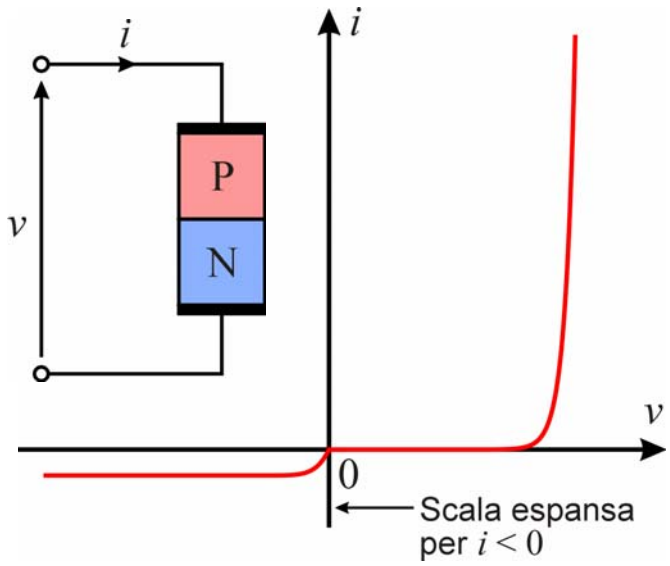
- Le lacune iniettate nella regione n si ricombinano con gli elettroni, che in questa regione sono le cariche maggioritarie
- La loro concentrazione decresce rapidamente (con legge esponenziale) allontanandosi dalla regione svuotata
- ➡ Le ricombinazioni determinano la scomparsa di elettroni, quindi nuovi elettroni vengono richiamati dal circuito esterno verso la regione n
- Analogamente, gli elettroni iniettati nella regione p si ricombinano con le lacune e quindi la loro concentrazione si riduce allontanandosi dalla regione svuotata
- Questo richiede che nuove lacune vengano immesse nella regione p dal circuito esterno per compensare quelle che scomparse a causa delle ricombinazioni
- ➡ Di conseguenza si deve avere un'immissione di elettroni nel circuito esterno dalla regione p

Equazione caratteristica della giunzione pn

- L'equazione caratteristica della giunzione pn è espressa dalla relazione

$$i = I_S\left(e^{v/V_T} - 1\right)$$ **Equazione di Shockley**

- Per $v < 0$ la corrente i ha valore praticamente costante ($i \approx -I_S$)
- In condizioni di polarizzazione diretta la corrente è trascurabile per valori di v inferiori a circa 0.5 - 0.6 V, quindi aumenta molto rapidamente
- ➡ Per valori di interesse pratico della corrente i, v varia in un intervallo molto piccolo (tipicamente tra 0.6 e 0.8 V)



(I valori indicati si riferiscono al caso del silicio)

Equazione caratteristica della giunzione pn

- I_S = **corrente di saturazione**
  (i valori tipici per il silicio sono dell'ordine di 10^{-15} - 10^{-9} A)
  - E' proporzionale all'area della sezione trasversale della giunzione
  - E' fortemente dipendente dalla temperatura

- V_T = **tensione termica**

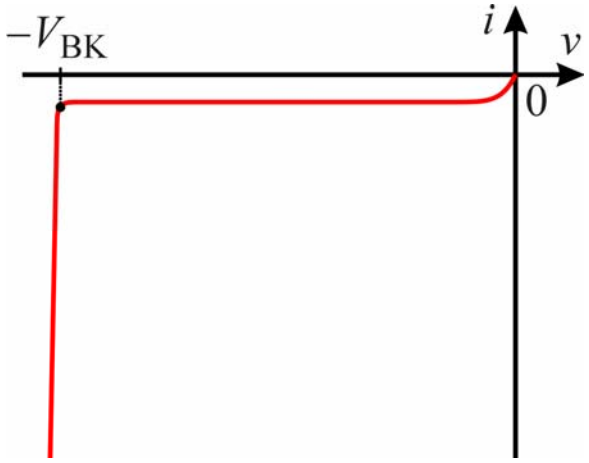
$$V_T = \frac{k_B T}{q}$$

k_B = costante di Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K
T = temperatura assoluta (K)
q = carica dell'elettrone = 1.602×10^{-19} C

Per $T = 300$ K si ha $V_T \approx 26$ mV

Breakdown

- Aumentando la tensione di polarizzazione inversa la corrente rimane praticamente costante fino a quando non viene raggiunto un valore detto **tensione di breakdown**, oltre i quale la corrente aumenta molto rapidamente a tensione praticamente costante
- Il valore della tensione di breakdown dipende dal drogaggio e può variare da pochi volt a oltre $1000\ \mathrm{V}$
- Il fenomeno del breakdown è dovuto a due cause
  - effetto Zener
  - effetto valanga



Breakdown

- **Effetto Zener**
  - E' prevalente per tensioni di breakdown inferiori alla decina di volt
  - Si verifica quando il campo elettrico nella regione svuotata diviene sufficientemente intenso da rompere alcuni legami covalenti generando coppie elettrone-lacuna
- **Effetto valanga**
  - E' prevalente per tensioni di breakdown superiori alla decina di volt
  - Si verifica quando le cariche che costituiscono la corrente di deriva acquistano energia cinetica sufficiente a rompere i legami covalenti degli atomi con cui collidono
  - Le cariche liberate, a loro volta, possono avere energia sufficiente a rompere ulteriori legami e liberare altre cariche, determinando una moltiplicazione "a valanga" delle cariche libere