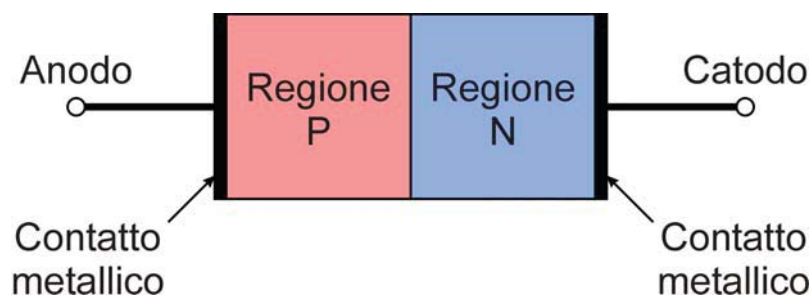


Giunzione pn

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**)

3

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 E che si oppone alla corrente di diffusione
- Tra le sezioni alle estremità della regione svuotata si 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

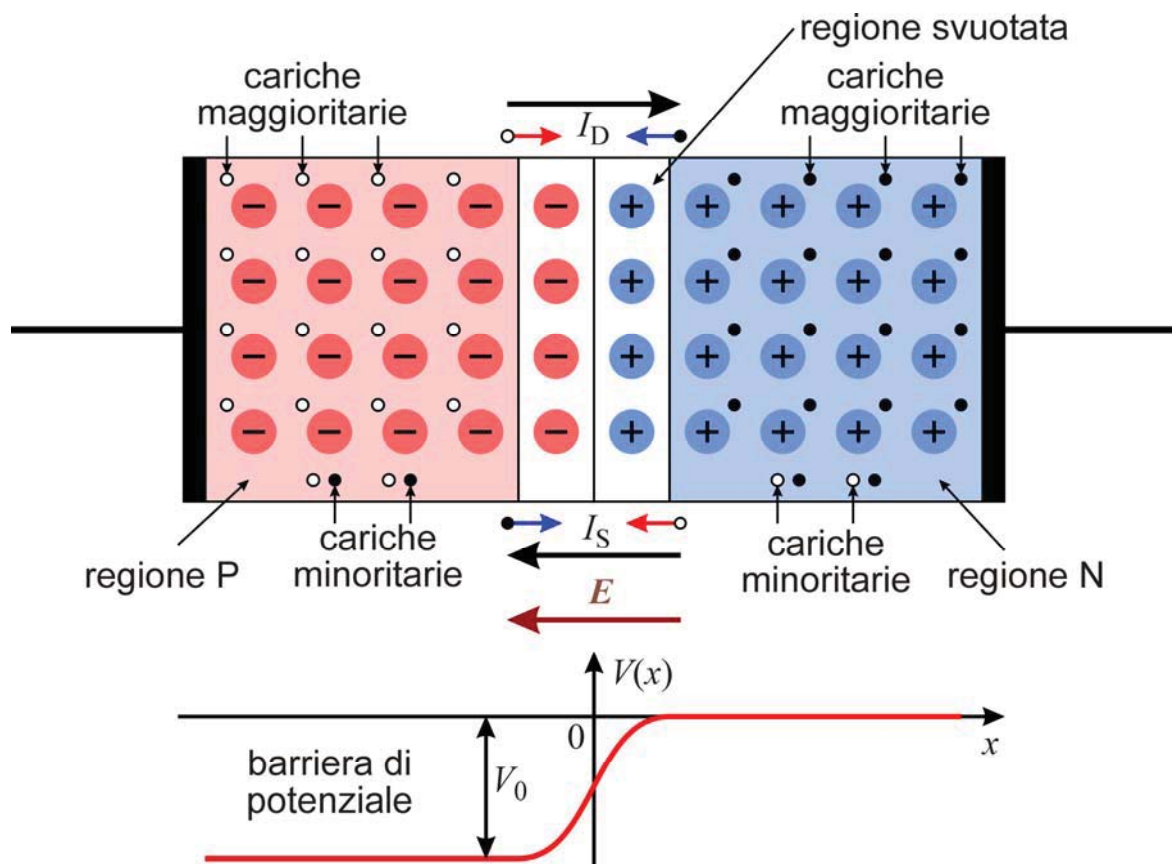
4

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

5

Giunzione pn in equilibrio



6

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)

7

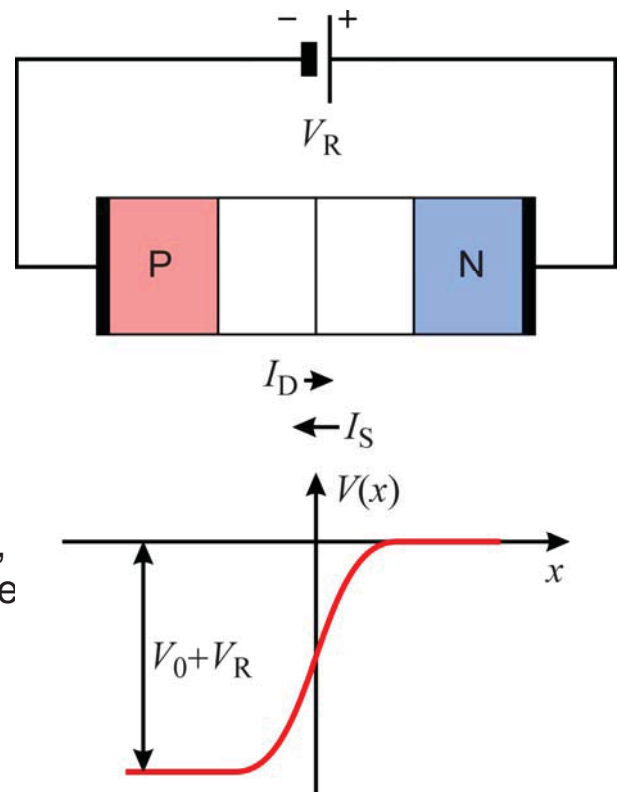
Giunzione polarizzata

- 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

8

Giunzione polarizzata inversamente

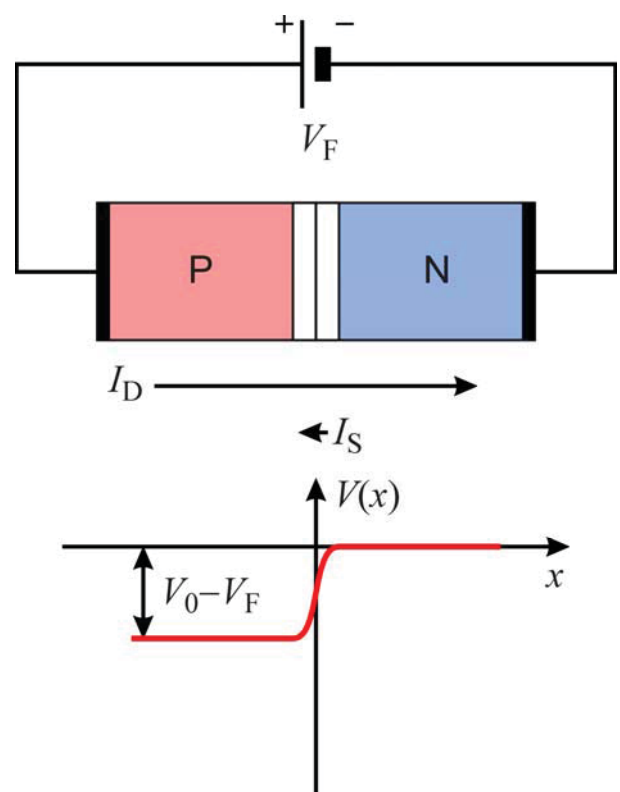
- La tensione di polarizzazione V_R richiama le lacune verso il terminale negativo gli elettroni verso il positivo
- La regione svuotata si allarga
- Aumenta il numero di cariche fisse non neutralizzate e, di conseguenza, anche l'ampiezza della barriera di potenziale, che diviene pari a $V_0 + V_R$
- 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 praticamente indipendente da V_R (mentre varia sensibilmente con la temperatura)



9

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



10

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 scomparse a causa delle ricombinazioni
- ➔ Di conseguenza si deve avere un'immissione di elettroni nel circuito esterno dalla regione p

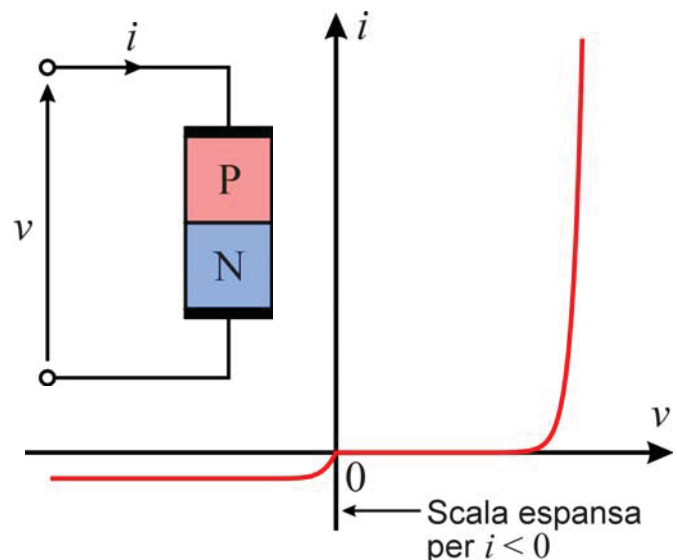
11

Equazione caratteristica della giunzione pn

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

$$i = I_S (e^{v/V_T} - 1) \quad \text{Equazione di Shockley}$$

- 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)

12

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)

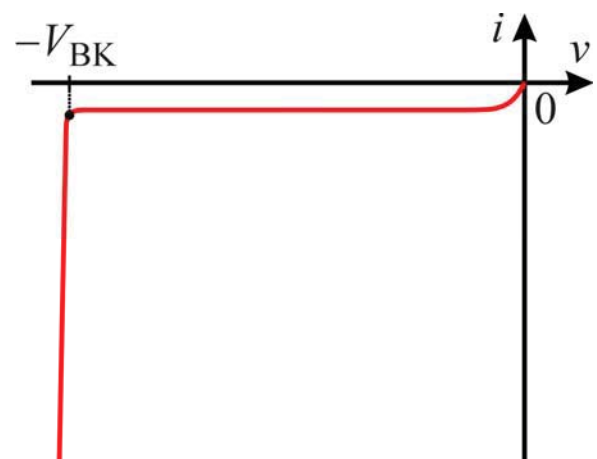
q = carica dell'elettrone = 1.602×10^{-19} C

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

13

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 il 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 V
- Il fenomeno del breakdown è dovuto a due cause
 - ◆ effetto Zener
 - ◆ effetto valanga



14

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