

Giunzione pn

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

Tipi di materiali solidi

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

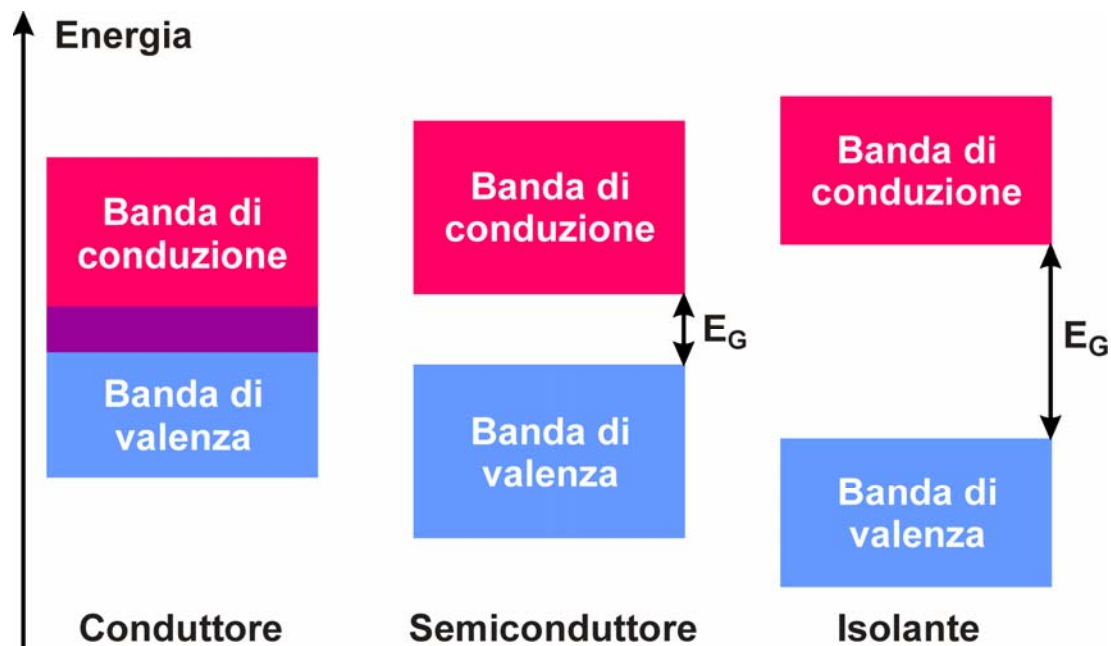
3

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 $T = 0 \text{ K}$ 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**

4

Banda di conduzione e di valenza



5

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, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)
 - ◆ 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

6

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**

7

Materiali semiconduttori

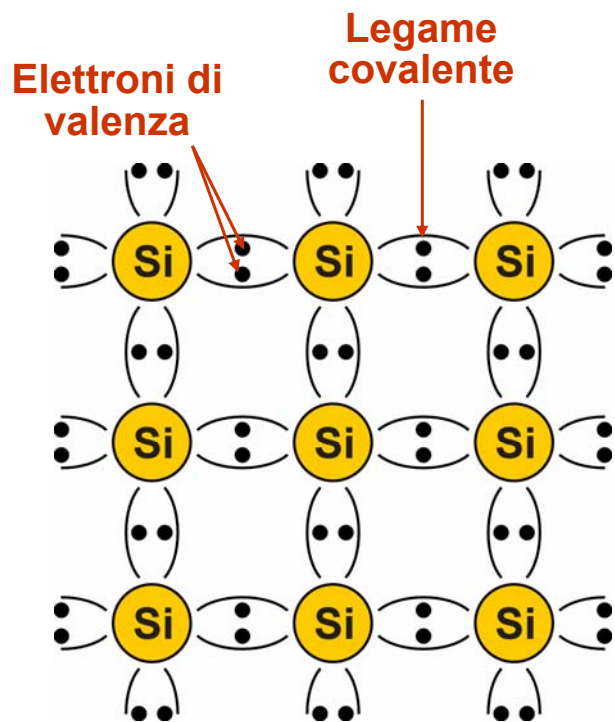
- Oltre agli elementi semiconduttori (silicio e germanio) esistono anche semiconduttori composti
- Questi ultimi, in prevalenza, sono formati da combinazioni di elementi dei gruppi IIIA e VA (es. GaAs) o dei gruppi IIB e VIA (es. CdS)
- I semiconduttori composti sono impiegati in applicazioni particolari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

	IIIA	IVA	VA	VIA	
	5 B	6 C	7 N	8 O	
	13 Al	14 Si	15 P	16 S	
IIB	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

8

Silicio intrinseco

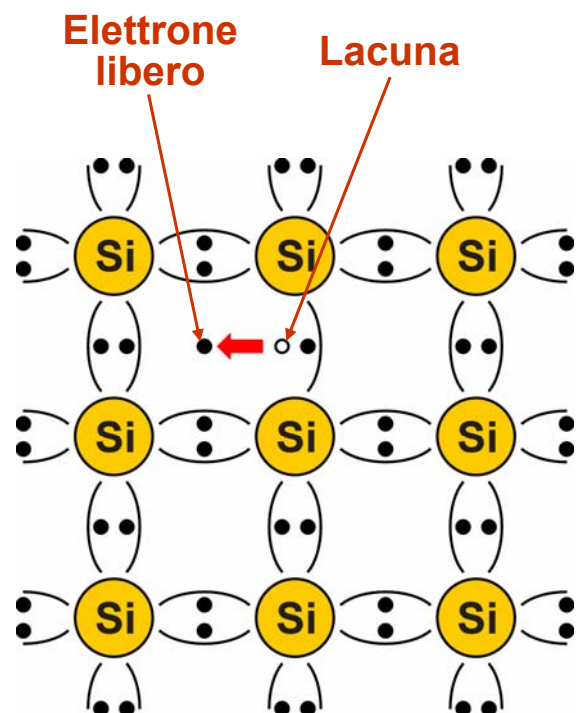
- Un atomo di silicio ha 4 elettroni nello strato più esterno (**elettroni di valenza**)
- In un cristallo di silicio ciascuno di questi elettroni viene condiviso con uno degli atomi più vicini
- Una coppia di elettroni condivisi dà origine a un **legame covalente**
- In questo modo per ogni atomo viene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



9

Elettroni e lacune

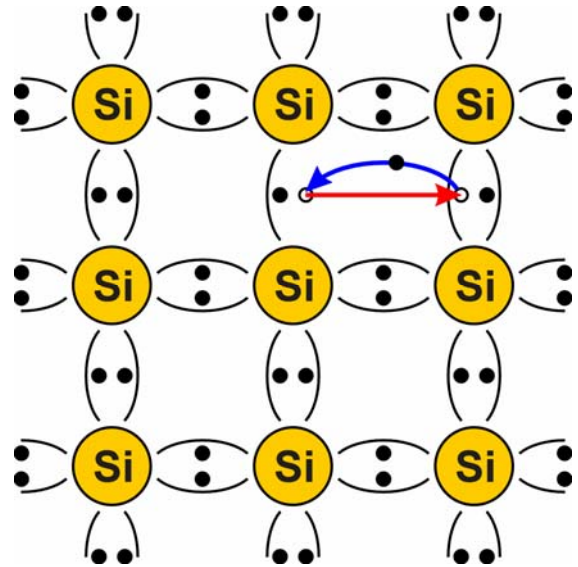
- Per $T = 0\text{ K}$ tutti gli elettroni di valenza sono legati a coppie di atomi
- ➔ Non ci sono elettroni disponibili per dare luogo a correnti elettriche
- All'aumentare di T un certo numero di elettroni può acquistare l'energia sufficiente per rompere il legame e quindi può muoversi liberamente nel cristallo
- In questo modo un legame rimane incompleto
- ➔ Si forma una **lacuna**



10

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



11

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 $n_i \approx 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

12

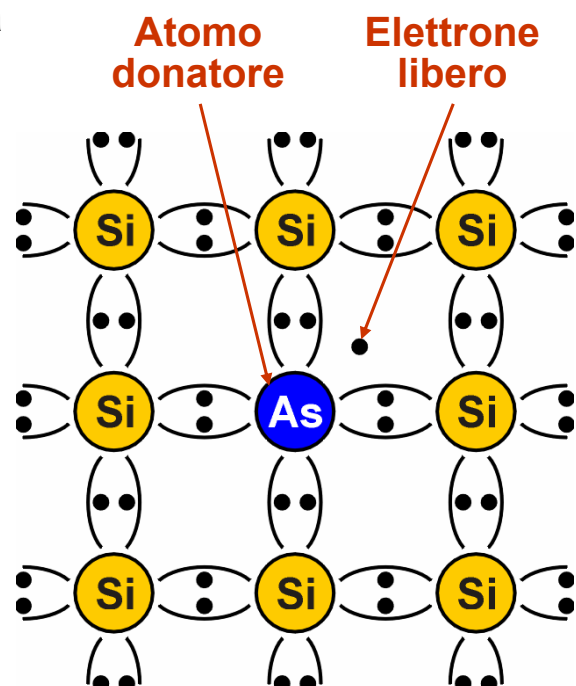
Accettori e donatori

- 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**

13

Silicio di tipo n

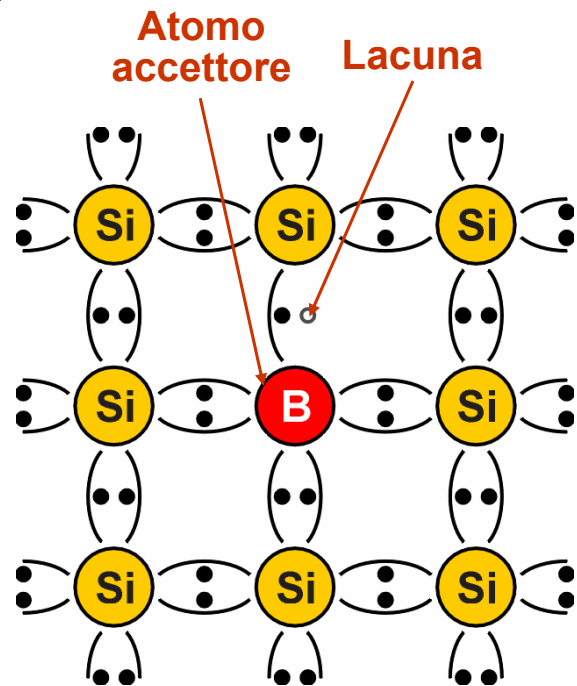
- Alcuni atomi di silicio sono sostituiti da atomi di un elemento pentavalente (es. arsenico)
- 4 degli elettroni di valenza degli atomi donatori formano legami covalenti
- Il quinto elettrone risulta debolmente legato all'atomo donatore
- ➔ Alle temperature ordinarie può acquistare energia sufficiente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



14

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



15

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
$$p \approx N_A$$

16

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

17

Corrente di deriva

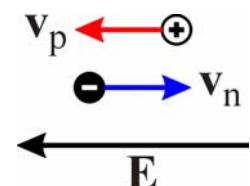
- In presenza di un campo elettrico esterno \mathbf{E} , le lacune sono accelerate nella direzione del campo e gli elettroni nella direzione opposta
- Dato che le cariche mobili sono soggette ad un'azione frenante dovuta alle interazioni con il reticolo cristallino, le loro velocità risultano proporzionali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

$$\mathbf{v}_p = \mu_p \mathbf{E}$$

$$\mu_p = \text{mobilità delle lacune}$$

$$\mathbf{v}_n = -\mu_n \mathbf{E}$$

$$\mu_n = \text{mobilità degli elettroni}$$



- 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} cm^{-3}

18

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 ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ 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

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

19

Esempio

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

$$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$n = p = n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

→ quindi

$$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n) \approx 4.3 \times 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma} \approx 2.4 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$$

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

$$n \approx N_D = 10^{15}$$

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

→ quindi

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

20

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

21

Corrente di diffusione

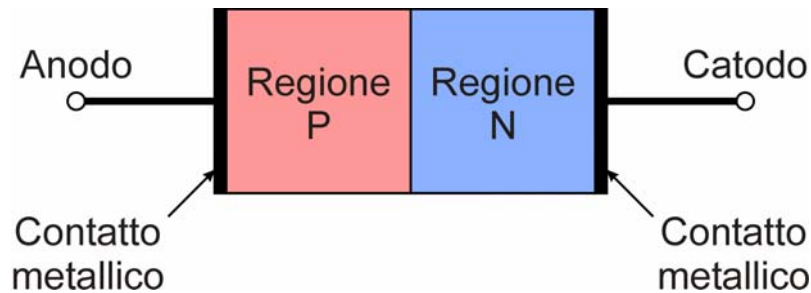
- Quindi le densità di corrente di diffusione dovute agli elettroni e alle lacune possono essere espresse nella forma

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

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

22

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**

23

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**)

24

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 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

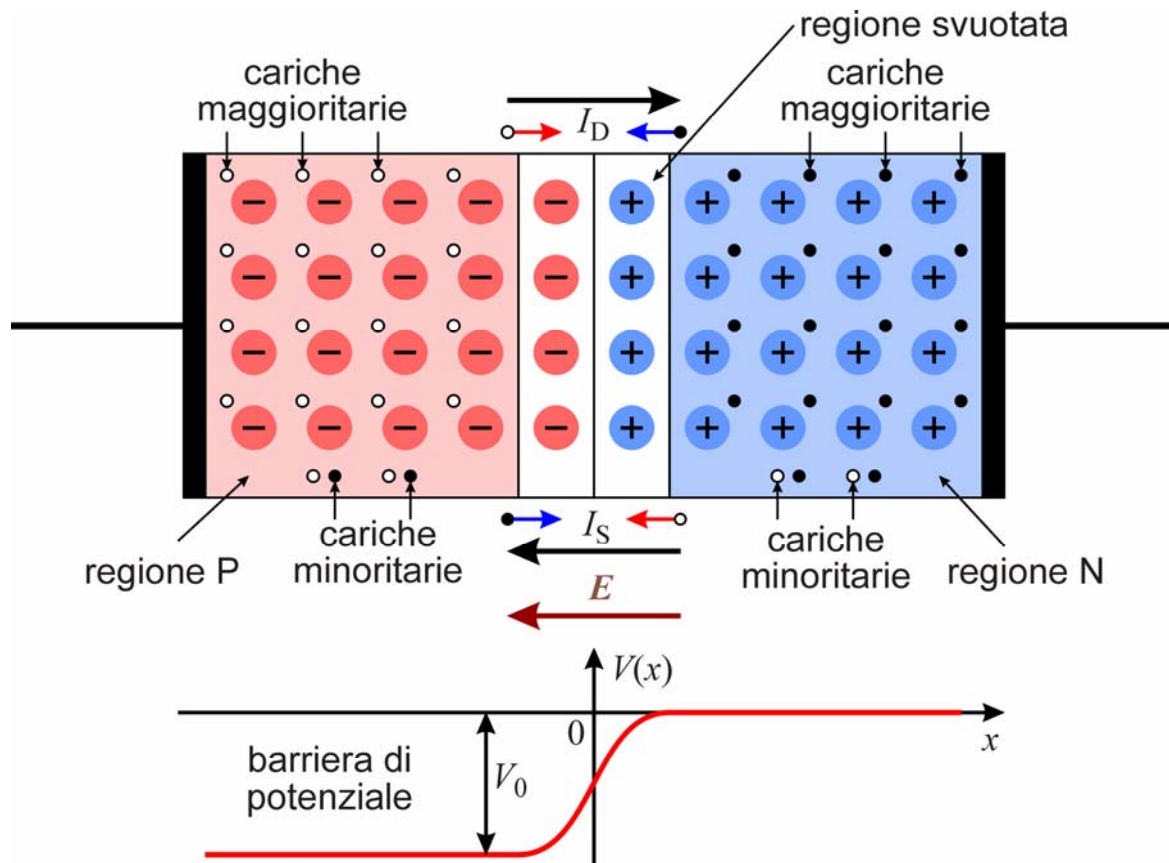
25

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

26

Giunzione pn in equilibrio



27

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)

28

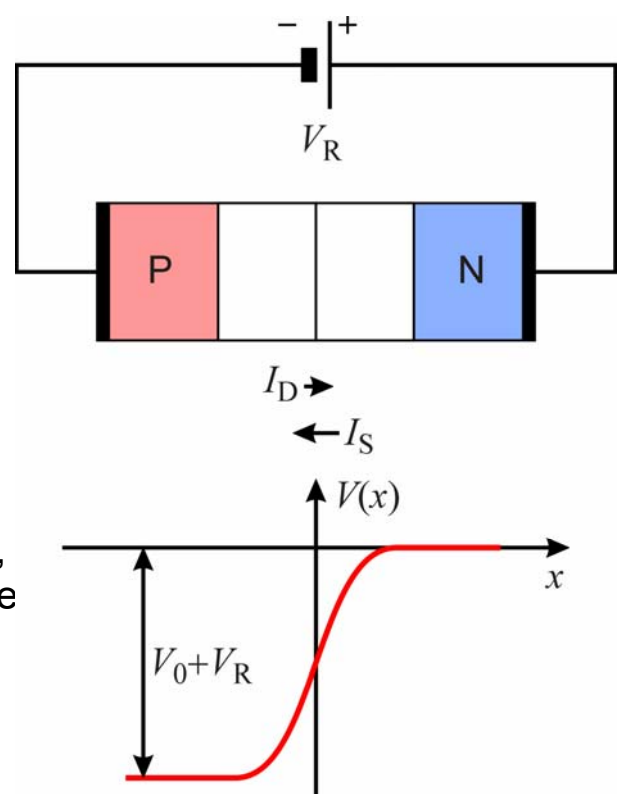
Giunzione polarizzata

- 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

29

Giunzione polarizzata inversamente

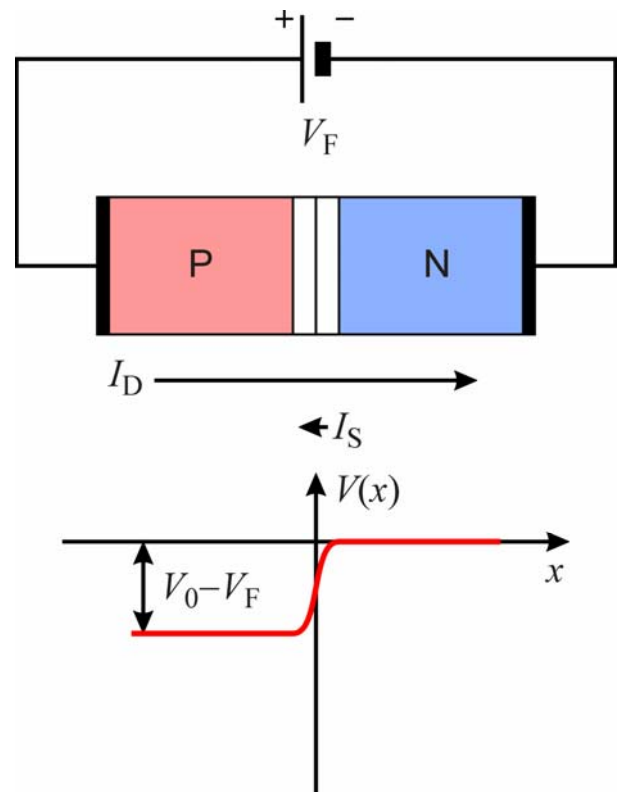
- La tensione di polarizzazione V_R richiama le lacune verso il terminale negativo gli elettroni verso il positivo
- La regione svuotata si allarga
- Aumenta il numero di cariche fisse non neutralizzate e, di conseguenza, anche l'ampiezza della barriera di potenziale, che diviene pari a $V_0 + V_R$
-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



30

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



31

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

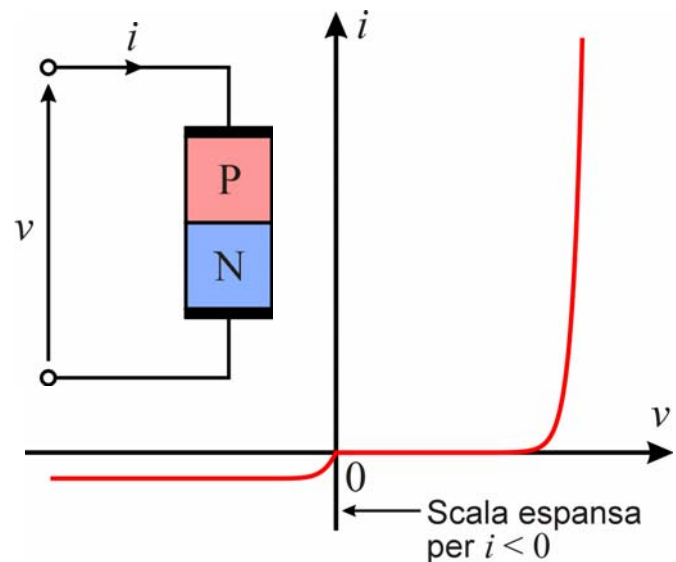
32

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)

33

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)

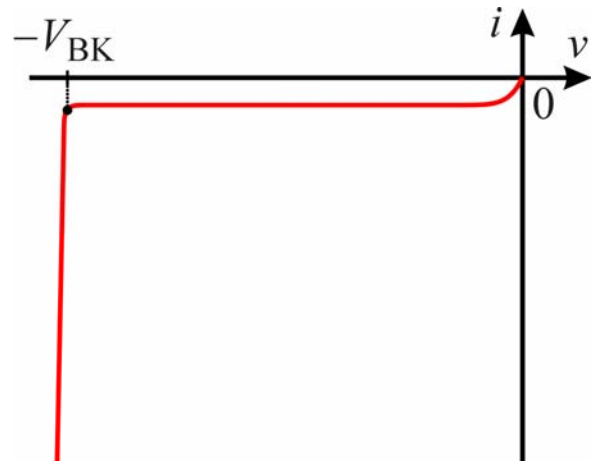
$q =$ carica dell'elettrone = 1.602×10^{-19} C

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

34

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



35

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

36