

Proprietá dei materiali semiconduttori

1.1 Introduzione

I dispositivi elettronici basano il loro funzionamento sulle proprietà di una classe di materiali detti semiconduttori. Questo termine non va inteso nel senso che essi si comportano quasi come dei normali conduttori metallici; al contrario essi godono di caratteristiche assolutamente sconosciute a questi ultimi. Tra queste, due sono particolarmente rilevanti: la possibilità di variare a piacimento, con opportuni procedimenti, la loro conducibilità in un intervallo di circa 10 ordini di grandezza e la presenza di cariche elettriche mobili di segno positivo, dette lacune, in aggiunta agli elettroni, i quali sono invece le uniche cariche mobili presenti nei metalli.

Come sarà chiaro nel seguito di questo capitolo, è proprio lo sfruttamento di queste due proprietà che conferisce ai dispositivi elettronici caratteristiche del tutto singolari.

Come accennato in precedenza i materiali semiconduttori costituiscono una classe nella quale rientrano un gran numero di elementi e composti; ciononostante, è un dato di fatto che la quasi totalità dei dispositivi elettronici attuali sia basata sul silicio. Ad esso, pertanto, si farà riferimento quasi esclusivo in questo libro, con accenni a diverse tecnologie soltanto dove effettivamente rilevante.

1.2 Il silicio e la sua struttura cristallina

La comprensione del funzionamento dei dispositivi elettronici non può prescindere dalla conoscenza dei meccanismi microscopici che avvengono nel materiale di cui sono composti. Per questo motivo è necessario premettere alcune nozioni fondamentali sulla struttura cristallina del silicio e su come, da questa, discendano le relative proprietà di trasporto della corrente.

È opportuno ricordare che il silicio è uno degli elementi più abbondanti esistenti in natura, esso si trova in genere sotto forma di silicati i quali costituiscono circa il 90% della crosta terrestre. Quella che si usa in elettronica è la forma cristallina di questo materiale, una forma, cioè, in cui i

vari atomi sono legati tra loro in una struttura perfettamente ordinata che si ripete periodicamente nello spazio.

Esempio: Il confronto tra il diamante e la grafite, entrambi costituite al 100% da atomi di carbonio, rende bene l'idea di quanto le proprietà di un materiale in forma cristallina possano essere diverse da quelle dello stesso materiale in cui gli atomi sono legati in maniera disordinata.

Nella Fig.1.1 è riportato uno schema molto semplificato della disposizione degli atomi di silicio all'interno del cristallo; ogni atomo è rappresentato dal suo nucleo e dai soli elettroni di valenza, essendo il silicio un elemento appartenente al IV gruppo della tavola periodica degli elementi, intorno ad ogni nucleo sono presenti 4 elettroni di valenza.

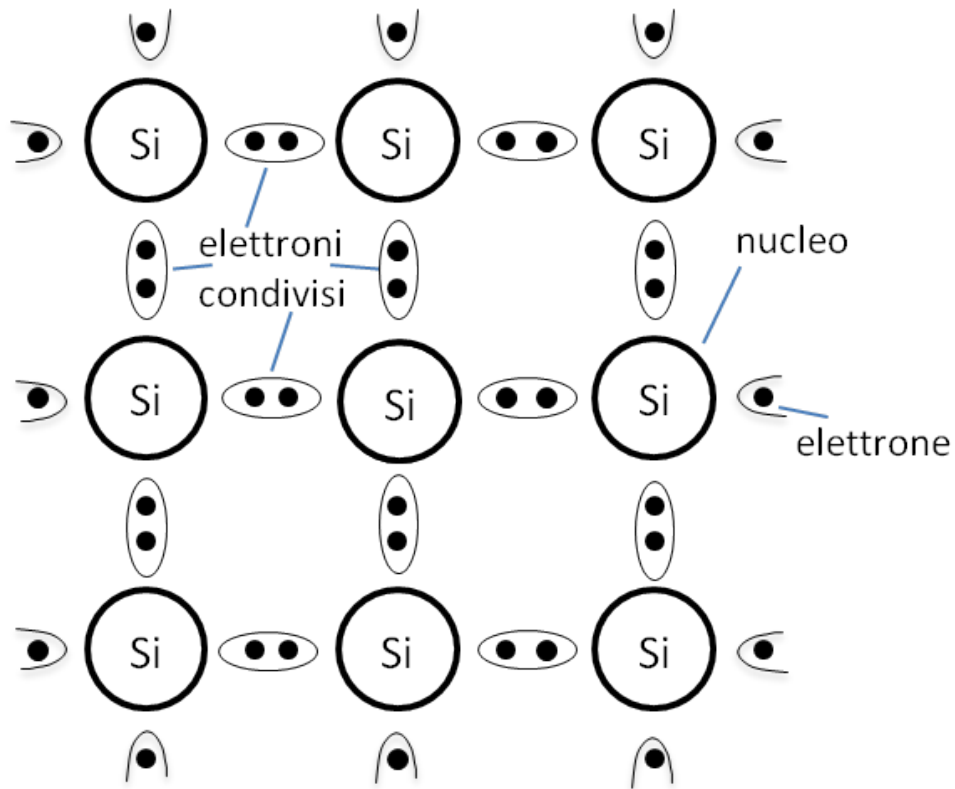


Figura 1.1 Struttura cristallina semplificata del silicio

Ogni atomo di silicio è contornato da altri quattro atomi ed è legato ad ognuno di essi tramite la condivisione di un elettrone. Questo tipo di

legame chimico si chiama covalente ed è un legame estremamente stabile, caratteristico di materiali rigidi ed indeformabili; diversamente da quanto avviene nei metalli dove le deboli forze di attrazione tra i nuclei e gli elettroni conferiscono a tali materiali le note proprietà di malleabilità, duttilità etc. La conseguenza elettrica del tipo di legame chimico è che nel silicio, essendo gli elettroni tutti vincolati nei legami covalenti, non ci sono cariche libere di muoversi e disponibili per la conduzione di corrente elettrica. In altri termini, a prima vista, il silicio sembra essere un perfetto isolante. In realtà, per quanto forte sia, il legame covalente può essere spezzato, a patto di fornire all'elettrone energia sufficientemente grande. A questo proposito, non bisogna pensare che, a livello microscopico, la materia sia immobile. Infatti, tutte le particelle del cristallo sono, per effetto della temperatura, in continua agitazione e possiedono un'energia media che corrisponde proprio alla temperatura a cui si trova il materiale. Quando si parla di energia media riferita agli elettroni, ci si sta riferendo ad un enorme numero di elementi; infatti in un cm^3 di silicio ci sono circa 10^{22} atomi e di conseguenza un numero di elettroni di valenza quattro volte superiore. La media tra le energie comprende, *probabilmente*, un esiguo numero di elettroni che sono sostanzialmente fermi ed altri che, invece, posseggono un'energia molto alta. Questi ultimi hanno la possibilità di liberarsi dal loro legame divenendo **elettroni liberi**. La conoscenza della distribuzione statistica dell'energia degli elettroni all'interno del silicio ha permesso di valutare che, a temperatura ambiente, soltanto un elettrone ogni mille miliardi riesce a liberarsi. Per quanto questo numero possa sembrare piccolo esso corrisponde a dire che, a temperatura ambiente, nel silicio sono presenti circa 10^{10} elettroni liberi per ogni cm^3 . Questo valore viene detto **concentrazione intrinseca** e si indica con il simbolo n_i . Non esiste formula che riguarda i dispositivi elettronici in silicio nella quale non compaia, in maniera esplicita od implicita, la concentrazione intrinseca dei portatori di carica.

È utile sapere che la concentrazione intrinseca dipende fortemente dalla temperatura secondo la relazione

$$n_i \cong 9.1 \left(\frac{T}{300} \right) 2e^{-\frac{0.6}{kT}} \quad (1.1)$$

dove T è la temperatura misurata in gradi Kelvin e k è la costante di Boltzman. Questa dipendenza si riflette in un'analoga dipendenza dalla temperatura delle caratteristiche elettriche dei dispositivi elettronici, si tratta di un problema di grande rilevanza pratica del quale si darà conto ampiamente nei capitoli successivi.

1.2.1 Un punto di vista alternativo: le bande di energia

Senza voler entrare in dettagli che esulano dagli obiettivi di questo testo, è utile accennare, in maniera qualitativa, alla rappresentazione che dei

fenomeni descritti in precedenza si dà nella fisica dello stato solido. Il punto fondamentale è che, in un semiconduttore, un elettrone o è fortemente legato al suo atomo oppure è completamente libero, non esistono situazioni intermedie. Se è legato, la sua energia è inferiore ad una certa soglia, si trova cioè all'interno di una banda di valori possibili, detta banda di valenza, il cui limite superiore viene indicato con E_V (vedi Fig.1.2).

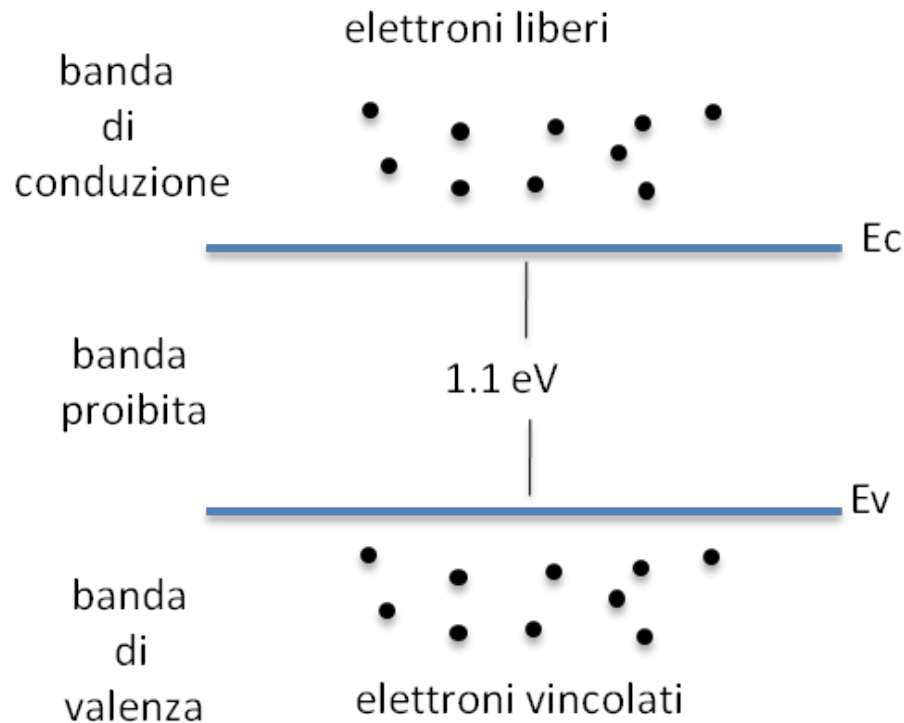


Figura 1.2 Bande di energia nel silicio

Se invece l'elettrone è libero la sua energia è superiore ad una certa soglia, si trova cioè all'interno di una banda di valori possibili, detta banda di conduzione, il cui limite inferiore viene indicato con E_C ; un elettrone che si trovi in banda di conduzione è libero di muoversi e può partecipare alla conduzione della corrente. Nei semiconduttori E_C è sempre maggiore di E_V e in nessun caso l'elettrone può possedere energia intermedia tra E_V ed E_C , esiste cioè una banda di valori di energia che non possono essere assunti, detta **banda proibita** o *bandgap*. Questa visione si estende dai semiconduttori a qualsiasi tipo di materiale; i conduttori, infatti, sono

caratterizzati dal fatto che non esiste banda proibita, mentre gli isolanti si distinguono per una banda proibita estremamente ampia che non permette agli elettroni il passaggio allo stato libero. In particolare l'ampiezza della banda proibita del silicio vale, a temperatura ambiente, circa 1.1 eV (si ricorda che quando si parla di elettroni, per comodità di notazioni, le energie non vengono misurate in Joule ma in elettronvolt [eV]; 1 eV corrisponde all'energia di un elettrone che si trova al potenziale di 1 V, poiché la carica dell'elettrone è pari a $1.6 \cdot 10^{-19}$ coulomb $1eV = 1.6 \cdot 10^{-19}$ J), ciò significa che bisogna fornire all'elettrone almeno 1.1 eV per provocare la rottura del legame covalente. Come termine di paragone si consideri che la banda proibita del diamante (un isolante) è pari a circa 5.5 eV, mentre nei metalli la banda proibita ha ampiezza nulla e gli elettroni sono, di fatto, sempre liberi.

1.3 La lacuna

Torniamo alla rappresentazione schematica della struttura cristallina del silicio.

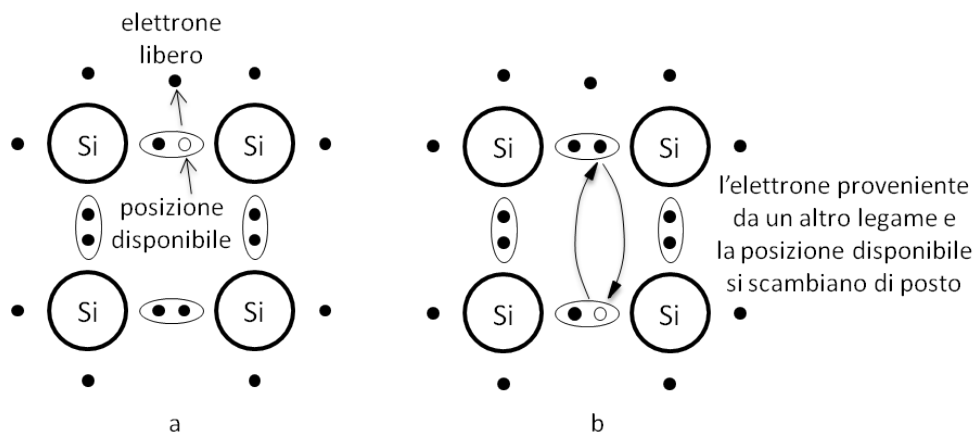


Figura 1.3 (a) Elettrone libero per effetto dell'agitazione termica. (b) La posizione lasciata libera si scambia di posto con un elettrone proveniente da un altro legame covalente

Si è detto che, a patto di fornire un'energia almeno pari ad 1.1 eV, è possibile liberare un elettrone e renderlo disponibile per la conduzione. Se ciò avviene, è evidente che l'elettrone lascia dietro di sé un legame covalente non soddisfatto (Fig.1.3a).

Poiché si tratta di posizioni energeticamente equivalenti è *probabile* che, a seguito dell'agitazione termica, cui tutte le cariche sono soggette, questa posizione venga occupata da un elettrone che si trova in un legame adiacente (Fig.1.3b). Conseguentemente il legame non soddisfatto si sposta in una nuova posizione; il processo si ripete in maniera casuale fintantoché non si impone al movimento degli elettroni una direzione preferenziale. Infatti, se dall'esterno viene applicato un campo elettrico è più probabile che, ad occupare la posizione libera, sia un elettrone proveniente dalla direzione del campo elettrico.

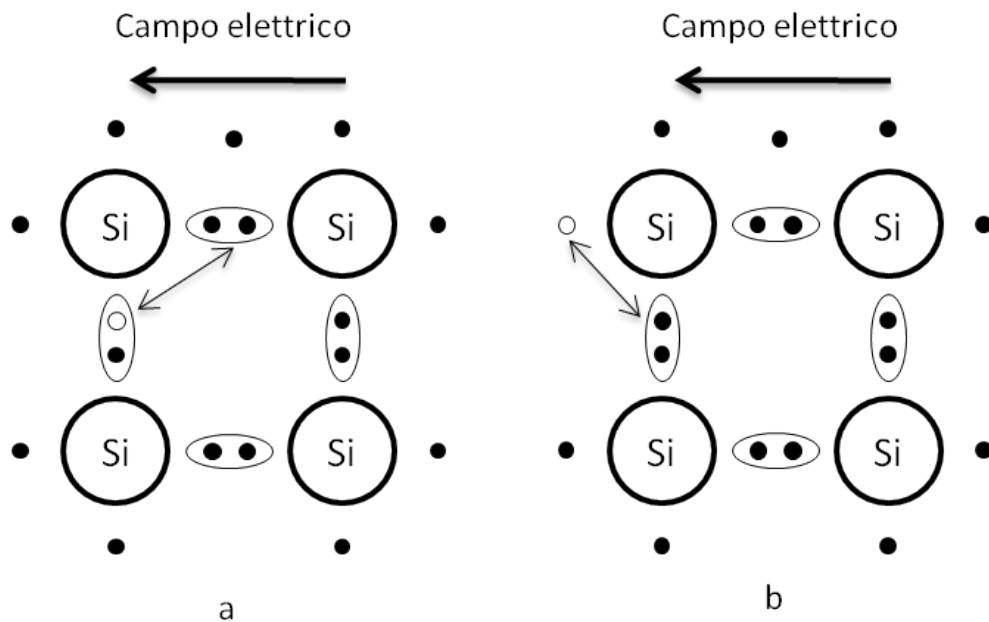


Figura 1.4 (a) La posizione libera della Fig.(Fig.1.3a viene occupata da un elettrone proveniente da sinistra. (b) Il processo si ripete e la posizione libera si sposta ancora più a sinistra

Con riferimento alla 1.4, dove il campo elettrico è diretto verso sinistra, si ha una maggiore probabilità che la posizione libera si scambi di posto con un elettrone proveniente da sinistra in quanto il campo elettrico sovrappone, all'agitazione termica disordinata, un moto preferenziale. Il risultato netto, che si evince dal confronto tra la Fig.1.3a e la Fig.1.4b, è che la posizione libera si è spostata nel verso del campo elettrico, si è cioè comportata allo stesso modo di una carica positiva soggetta allo stesso campo elettrico. A questa mancanza di un elettrone viene dato il nome di **lacuna** e, dal punto di vista macroscopico, il suo comportamento è assolu-

tamente coincidente con quello di una carica positiva libera di muoversi nel cristallo; la sua carica vale, come per l'elettrone, $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C ma con segno positivo. E' importantissimo sottolineare che, per quanto per giustificare il movimento della lacuna si sia partiti dal movimento degli elettroni che vanno ad occupare la posizione libera, in nessuna situazione è possibile guardare al moto delle lacune come ad elettroni che si muovono in verso opposto. Quantisticamente (il lettore perdonerà l'uso di questo termine che sembra adoperato per l'incapacità di dare spiegazioni intuitivamente plausibili) la lacuna è una carica libera positiva e considerarla diversamente porta ad enormi errori macroscopici.

Poiché una lacuna si forma ogni volta che si libera un elettrone è evidente che i due tipi di portatori sono presenti nel semiconduttore con uguale concentrazione, cioè

$$n = p = n_i \quad (1.2)$$

dove con n si è indicata la concentrazione degli elettroni e con p la concentrazione delle lacune. In altri termini in un semiconduttore puro la concentrazione delle lacune è uguale alla concentrazione degli elettroni e coincide con la concentrazione intrinseca. Un semiconduttore puro viene anche definito **intrinseco**. Dalla relazione precedente è evidente che in un semiconduttore intrinseco vale la seguente uguaglianza

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.3)$$

Tale relazione si chiama **legge dell'azione di massa**, la sua rilevanza sarà chiara nei paragrafi che seguono.

Esempio: La conducibilità del silicio intrinseco può essere espressa tramite la formula

$$\sigma = qKn_i \quad (1.4)$$

dove $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C è la carica dell'elettrone e K è una costante che, a temperatura ambiente, vale circa $2000 [cm^2 / (V \cdot s)]$, da cui si ricava

$$\sigma \cong 3.2 \cdot 10^{-6} [ohm \cdot cm]^{-1} \quad (1.5)$$

Per fare un raffronto con i metalli si consideri che la conducibilità dell'alluminio è pari a circa $3 \cdot 10^5 [ohm \cdot cm]^{-1}$ cioè dieci miliardi di volte più grande.

1.4 Semiconduttore estrinseco

Dall'esempio numerico svolto nel paragrafo precedente risulta che la conducibilità del silicio intrinseco è estremamente bassa, tanto da poterlo

ritenere, di fatto, un isolante. I semiconduttori possiedono però l'interessante proprietà che la loro conducibilità può essere modulata inserendo nel materiale quantità controllate di impurità di natura opportuna. Tali impurità vengono dette **droganti** ed il semiconduttore che le contenga viene detto **drogato** oppure **estrinseco**. Per comprendere come la conducibilità del silicio possa essere modificata dalla presenza di un drogante facciamo riferimento alla Fig.1.5.

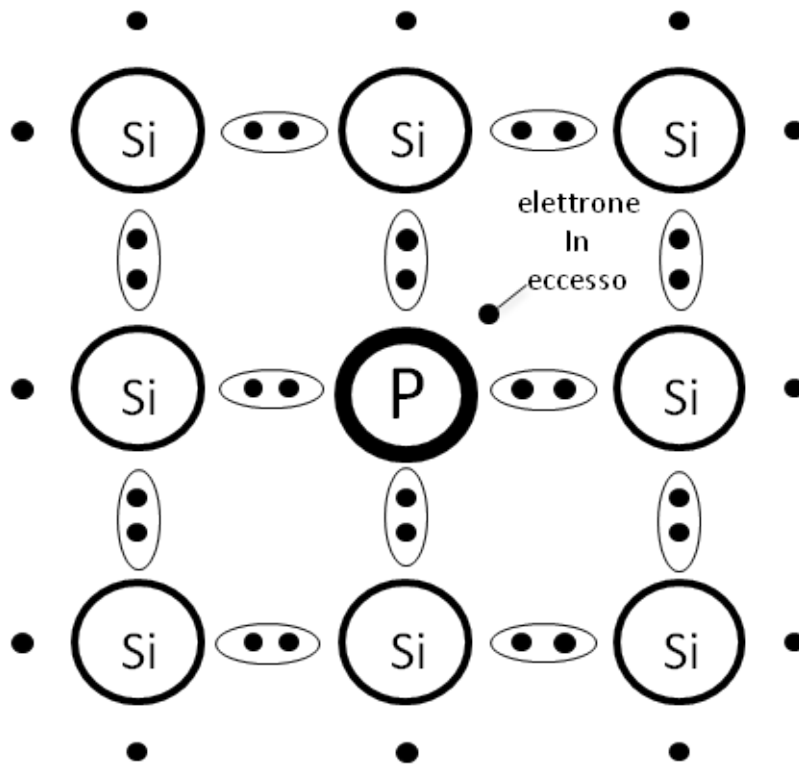


Figura 1.5 Reticolo del silicio con un atomo di fosforo che ne sostituisce uno di silicio

In essa si vede che uno degli atomi di silicio che formano il reticolo cristallino è stato sostituito da un atomo di fosforo (simbolo chimico P). La scelta del fosforo non è casuale, si tratta di un atomo del V gruppo della tabella periodica degli elementi, presenta quindi 5 elettroni nel livello più esterno, contro i quattro del silicio. Trovandosi in una posizione che prima era occupata dal silicio, l'atomo di fosforo è contornato da quattro atomi di silicio e ad essi si lega sfruttando quattro dei suoi elettroni di valenza. Il quinto elettrone non risulta quindi impegnato in alcun legame covalente e pertanto non è vincolato fortemente a rimanere in alcuna posizione parti-

colare; l'energia che lo lega al suo atomo è di soli 0.044 eV il che significa che a temperatura ambiente è già un elettrone libero. Si dice che l'atomo di fosforo ha donato un elettrone al cristallo di silicio e per questo viene detto **atomo donatore**. Tutti gli elementi del V gruppo della tavola periodica sono potenzialmente atomi donatori, va però considerata anche la loro dimensione che non deve distorcere troppo la struttura cristallina che li ospita, perciò nella tecnologia del silicio si fa uso quasi esclusivo di soli tre droganti donatori che sono il fosforo, l'arsenico (simbolo chimico As) e l'antimonio (simbolo chimico Sb).

Dalle considerazioni precedenti appare chiaro che ad ogni atomo donatore introdotto nel silicio corrisponde un elettrone che si aggiunge alla normale popolazione generata termicamente; se per esempio nel silicio viene *sciolta* una concentrazione di fosforo pari a 10^{15} atomi/cm³ si ottiene una corrispondente concentrazione di 10^{15} elettroni liberi/cm³ il che, ricordando che la concentrazione degli elettroni nel silicio non drogato è pari ad n_i , cioè circa 10^{10} elettroni liberi/cm³, significa aver incrementato la concentrazione degli elettroni liberi, e conseguentemente la conducibilità, di ben 5 ordini di grandezza.

Si noti che, dal punto di vista della purezza del cristallo di silicio, il cui reticolo è formato da circa 10^{22} atomi/cm³, aver introdotto 10^{15} atomi/cm³ di impurità significa aver modificato il materiale per una parte su 10 milioni senza quindi alterarne alcuna proprietà strutturale. Le tecnologie microelettroniche consentono di controllare la concentrazione dei droganti nel silicio in maniera estremamente precisa in un intervallo che va da circa 10^{12} atomi/cm³ a circa 10^{20} atomi/cm³ ottenendo quindi una analoga capacità di modularne la conducibilità.

Un cristallo di silicio nel quale siano stati introdotti atomi donatori si dice drogato **di tipo n** e la concentrazione di atomi donatori introdotta viene indicata con N_D . È importante sottolineare che il materiale drogato rimane comunque complessivamente neutro, nel senso che ad ogni elettrone che si è liberato, carica negativa, corrisponde l'atomo che lo ha donato, il quale, avendo perso quell'elettrone, è diventato uno ione positivo.

Un'altra considerazione importante è che il normale processo di generazione termica, cioè di rottura dei legami tra gli atomi di silicio per effetto della temperatura, continua anche nel semiconduttore drogato; succede però che, essendo presente una grande concentrazione di elettroni liberi forniti dagli atomi droganti, la probabilità che si liberino ulteriori elettroni è più bassa che nel caso intrinseco. Dal punto di vista energetico la cosa si può spiegare immaginando che la banda di conduzione sia già occupata da un gran numero di elettroni e pertanto è più difficile trovare spazio per gli elettroni provenienti dalla banda di valenza. Poiché, inoltre, all'elettrone fornito dal drogante non corrisponde la formazione di una lacuna, l'equilibrio tra le concentrazioni di elettroni e lacune viene alterato, in particolare in un semiconduttore drogato di tipo *n* saranno presenti molti più elettroni che lacune rimanendo però valida la legge dell'azione di massa.

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (1.6)$$

Esempio: supponiamo di aver drogato un pezzo di silicio con una concentrazione di atomi donatori $N_D = 10^{16}[\text{atomi}/\text{cm}^3]$, ognuno di questi dona un elettrone al reticolo cos che la concentrazione di elettroni sar anche essa $n = 10^{16}[\text{atomi}/\text{cm}^3]$ (avendo trascurato il piccolo contributo proveniente dalla generazione termica), la legge dell'azione di massa ci dice che la concentrazione delle lacune sar data da $p = \frac{n_i^2}{n} \cong \frac{10^{20}}{10^{16}} = 10^4[\text{lacune}/\text{cm}^3]$. L'enorme squilibrio tra la concentrazione di elettroni e quella di lacune giustifica la dizione di portatori maggioritari per i primi e minoritari per i secondi.

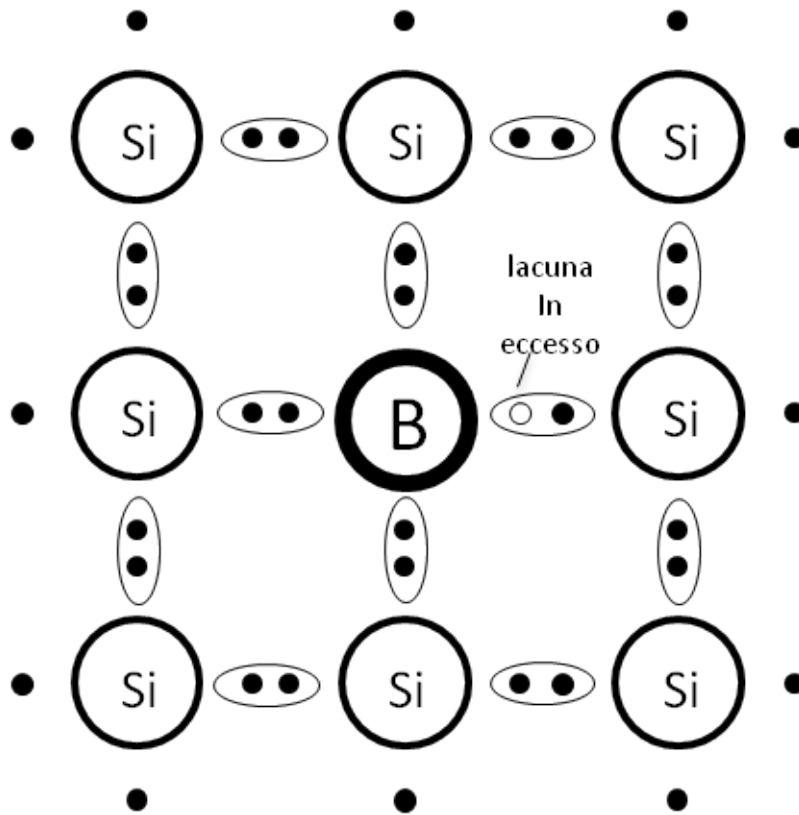


Figura 1.6 Reticolo del silicio con un atomo di boro che ne sostituisce uno di silicio

Un discorso del tutto simmetrico rispetto a quello appena fatto può essere ripetuto con riferimento alla possibilità di incrementare la popolazione

delle lacune. In questo caso l'atomo drogante dovrà appartenere al III gruppo della tavola periodica in modo da avere 3 elettroni di valenza nel livello più esterno. Questi tre elettroni andranno a formare altrettanti legami covalenti con 3 dei 4 atomi di silicio adiacenti, così come mostrato in Fig.1.6 dove si vede un atomo di Boro (B) che sostituisce un atomo di silicio nella struttura cristallina. In questo caso è energeticamente poco dispendioso (circa 0.045 eV) per un elettrone proveniente da un legame vicino andare ad occupare la quarta posizione disponibile per completare i legami del boro (Fig.1.7).

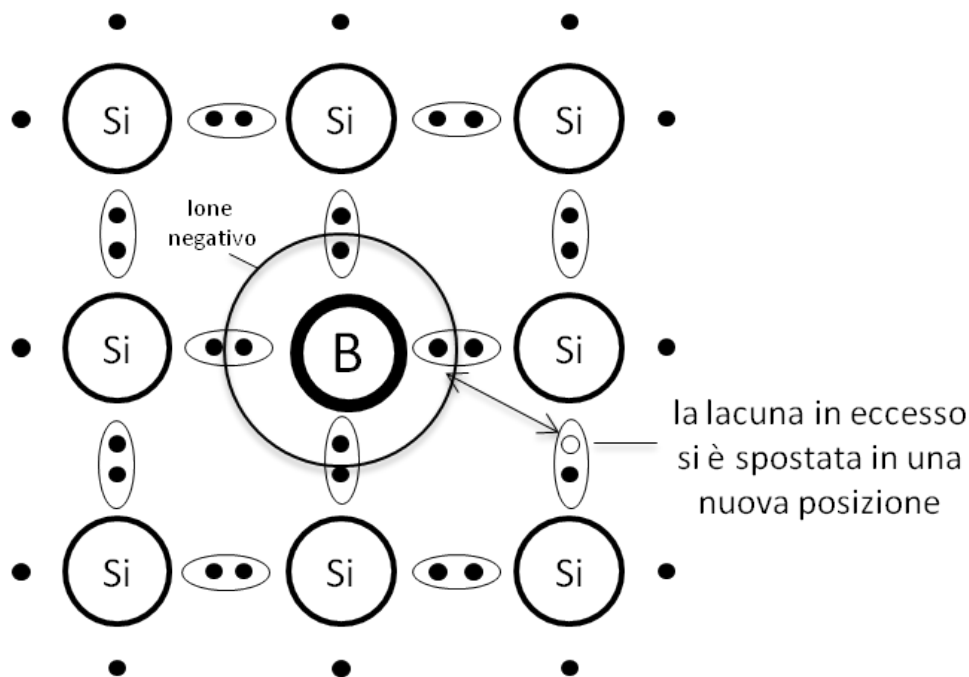


Figura 1.7 L'atomo di boro accetta un elettrone e diviene uno ione negativo

Quando ciò avviene si dice che il boro accetta un elettrone e, per tale motivo, viene detto **atomo accettore**; l'elettrone che è andato a legarsi al boro lascia dietro di sé una posizione disponibile, pertanto per ogni atomo accettore introdotto si ha la formazione di una lacuna aggiuntiva rispetto a quelle presenti nel semiconduttore intrinseco. Un cristallo drogato con atomi accettori viene detto di **tipo p** e la concentrazione degli atomi accettori viene indicata con N_A . Analogamente a quanto detto in precedenza il semiconduttore drogato rimane elettricamente neutro, infatti per ogni lacuna che si forma (carica positiva) c'è uno ione negativo costituito dall'atomo drogante che ha accettato un elettrone e che quindi possiede una carica

negativa in più rispetto alla sua condizione di neutralità. Per i semiconduttori di tipo p valgono le stesse considerazioni già presentate per quelli di tipo n, in particolare è possibile controllare la concentrazione degli atomi accettori, che vengono introdotti in maniera altrettanto accurata, ed è altrettanto vero che l'aggiunta di lacune fa diminuire la concentrazione degli elettroni liberi, restando sempre valida la legge dell'azione di massa. Gli elettroni (lacune) presenti in un materiale di tipo n (tipo p) vengono detti portatori di maggioranza o **maggioritari** mentre le corrispondenti lacune (elettroni) vengono dette portatori di minoranza o **minoritari**. Quando si vuole indicare se ci si trova in un semiconduttore di tipo n o di tipo p si aggiunge un pedice alla notazione che indica la concentrazione dei portatori.

Esempio: la notazione n_{no} indica la concentrazione degli elettroni in un semiconduttore di tipo n, l'ulteriore pedice o si usa per indicare che ci si riferisce ad una condizione di equilibrio termodinamico; allo stesso modo n_{po} , rappresenta la concentrazione degli elettroni in un semiconduttore di tipo p; p_{no} , sono le lacune in un semiconduttore di tipo n e p_{po} le lacune in un semiconduttore di tipo p

Più in generale, un semiconduttore può essere drogato contemporaneamente sia con atomi donatori che accettori, in questo caso nel materiale si trovano 4 tipi di cariche elettriche: gli elettroni liberi introdotti dagli atomi donatori, le lacune introdotte dagli atomi accettori, gli ioni positivi costituiti dagli atomi donatori che hanno perso un elettrone e gli ioni negativi formati dagli atomi accettori che hanno catturato un elettrone. Poiché il semiconduttore nel complesso deve restare neutro l'insieme delle cariche negative e positive deve bilanciarsi perfettamente, deve cioè valere la seguente legge della neutralità

$$n + N_A = p + N_D \quad (1.7)$$

è importante sottolineare il fatto che queste cariche non sono equivalenti tra loro nel senso che mentre n e p rappresentano cariche libere di muoversi che possono partecipare alla conduzione di corrente, N_A ed N_D rappresentano ioni fissi, inamovibilmente vincolati alla struttura cristallina. Conseguenza di ciò è che, anche se il semiconduttore nel complesso è neutro, non è detto che esso sia anche localmente neutro, è cioè possibile che, in determinate situazioni, si creino degli squilibri locali di carica con la conseguente creazione di differenze di potenziale all'interno del materiale. Anche questa è una evenienza sconosciuta ai materiali conduttori.

1.5 Correnti nei semiconduttori

1.5.1 La corrente ohmica

Poiché nei semiconduttori sono presenti cariche libere è possibile innescare una circolazione di corrente. In generale ad una data popolazione n di par-

ticelle con carica elettrica q che si muovono lungo una determinata direzione con velocità v è associata una densità di corrente data da

$$J = qnv \quad (1.8)$$

Nei semiconduttori la velocità v con cui si muovono le cariche elettriche è proporzionale al campo elettrico E ad esse applicato, si può cioè scrivere

$$v = \mu \cdot E \quad (1.9)$$

La costante di proporzionalità μ viene detta mobilità ed un parametro estremamente importante per i semiconduttori.

Più in particolare si trova che nel silicio, a parità di campo elettrico, le velocità con cui si muovono gli elettroni e le lacune sono diverse, si definisce cioè una mobilità per gli elettroni μ_n che è diversa (maggiore) dalla mobilità delle lacune μ_p ; valori tipici a temperatura ambiente sono $\mu_n = 1500[cm^2/Vs]$ e $\mu_p = 500[cm^2/Vs]$. Quindi, se in un semiconduttore è presente un campo elettrico si innescano due moti di cariche indipendenti e sovrapposti; al moto degli elettroni dovuto al campo elettrico è associata una densità di corrente, detta di trascinamento o di drift, data da

$$J_{ndrift} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (1.10)$$

mentre al moto delle lacune è associata la densità di corrente di *drift* delle lacune data da

$$J_{pdrift} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (1.11)$$

Le due correnti hanno lo stesso verso, che coincide con il verso del campo elettrico; infatti, gli elettroni si muovono in verso contrario al campo elettrico ma posseggono carica elettrica negativa, mentre le lacune sono cariche positive che si muovono nel verso del campo elettrico. La corrente totale dovuta al campo elettrico è data dalla somma delle due componenti, cioè

$$J_{drift} = J_{ndrift} + J_{pdrift} = q\mu_n nE + q\mu_p pE \quad (1.12)$$

Ricordando che la costante di proporzionalità tra densità di corrente e campo elettrico è, per definizione, la conducibilità σ del materiale, la formula precedente può essere interpretata nel senso che nei semiconduttori è possibile individuare un'aliquota della conducibilità dovuta agli elettroni, data da $\sigma_n = q\mu_n n$ ed un'aliquota della conducibilità dovuta alle lacune data da $\sigma_p = q\mu_p p$.

Riscrivendo la 1.11 nella forma

$$J_{drift} = (q\mu_n n + q\mu_p p) E = (\sigma_n + \sigma_p) E = \sigma E \quad (1.13)$$

concludiamo che la conducibilità del silicio è data dalla somma della conducibilità degli elettroni e della conducibilità delle lacune.

Esempio: E' interessante notare che quella appena scritta altro non è se non la legge di ohm. Infatti, dato un pezzo di silicio di lunghezza L e sezione S , cui sia applicata una tensione V , la nota relazione $I = V/R$ si trasforma nella 1.13 ponendo $I = J \cdot S$, $V = E \cdot L$, $R = L/(\sigma \cdot S)$.

In altre parole abbiamo scoperto che nei semiconduttori, al pari che nei metalli, vale la legge di ohm, per tale motivo la corrente di drift viene anche indicata come corrente ohmica.

1.5.2 La corrente di diffusione

La validità della legge di ohm nei semiconduttori è una proprietà interessante ma non rivoluzionaria, implica semplicemente che un pezzo di silicio omogeneo presenta un comportamento resistivo. In realtà la corrente ohmica, cioè proporzionale alla tensione applicata, non è l'unica componente di corrente che può circolare in un semiconduttore. Supponiamo per esempio, senza per il momento chiederci come sia possibile, che in una determinata regione di un semiconduttore sia presente una concentrazione di elettroni molto più alta che nelle regioni adiacenti, così come schematicamente illustrato nella Fig.1.8

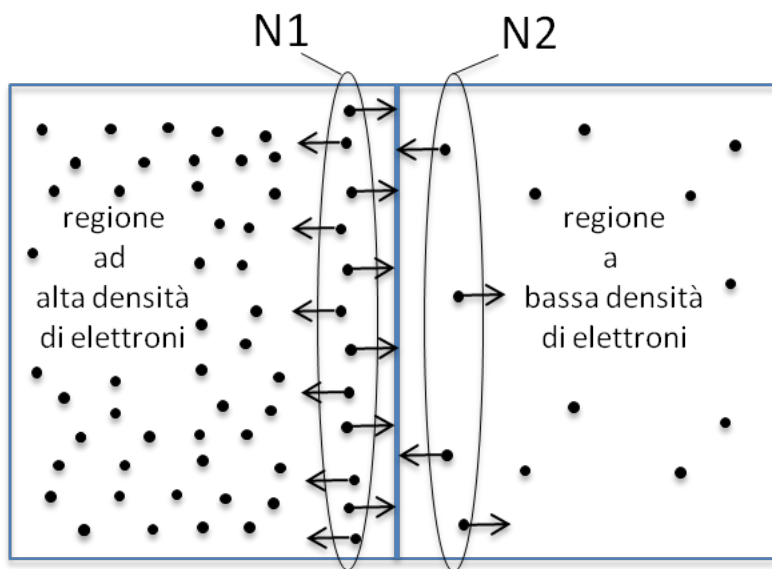


Figura 1.8 Meccanismo della diffusione in un semiconduttore con concentrazione di cariche disuniforme

dove sono rappresentati N_1 elettroni a ridosso dell'interfaccia nel lato sinistro e N_2 elettroni a ridosso dell'interfaccia nel lato destro con $N_1 > N_2$, supponiamo inoltre che non sia applicata nessuna tensione e che quindi il moto delle cariche sia dovuto esclusivamente all'agitazione termica. Trattandosi di un moto casuale è ragionevole immaginare che, per ogni elettrone, la probabilità di andare verso destra sia identica a quella di andare verso sinistra, per cui possiamo supporre che la metà vada in una direzione e l'altra metà nella direzione opposta. Riferendoci quindi alla sezione di confine tra le due regioni possiamo concludere che $N_1/2$ portatori vadano da sinistra verso destra e $N_2/2$ da destra verso sinistra; poichè $N_1 > N_2$ concludiamo che esiste un passaggio netto di elettroni da sinistra verso destra e quindi, in quella sezione, una corrente di elettroni diversa da zero.

Questa corrente viene detta **corrente di diffusione** e si osserva ogni volta che esiste una disuniformità nella concentrazione delle cariche elettriche, in quanto si manifesta una tendenza naturale per le particelle ad andare dalle regioni in cui sono presenti in concentrazione maggiore verso le regioni in cui sono presenti in concentrazione minore. Si tratta di un comportamento del tutto analogo a quello delle particelle di un gas che si espande in un ambiente ed anche la descrizione analitica di tale comportamento è analoga.

Da un punto di vista formale si trova che la corrente che circola in un semiconduttore in cui la concentrazione $n(x)$ degli elettroni sia variabile, come per esempio in Fig.1.9, è proporzionale alla derivata, cioè al gradiente, della concentrazione stessa.

In formule

$$J_{ndiff} = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1.14)$$

Dove q è la carica dell'elettrone e D_n , le cui dimensioni sono [cm^2/s], è un coefficiente di proporzionalità che si chiama **diffusività** o **coefficiente di diffusione degli elettroni**. Si osservi che, assunto come positivo il verso nel quale la concentrazione diminuisce, il segno della derivata è negativo e quindi, trattandosi di elettroni, il verso della corrente è opposto a quello verso cui diminuisce la concentrazione. E' ovvio che un discorso del tutto analogo pu essere ripetuto per le lacune dove, detta $p(x)$ la concentrazione, si trova che

$$J_{pdiff} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.15)$$

questa volta D_p si chiama diffusività delle lacune ed il segno è negativo perché, essendo la derivata anch'essa negativa, bisogna ottenere una corrente positiva nel verso della concentrazione decrescente. Per la diffusività valgono le seguenti **relazioni di Einstein**

$$\begin{aligned} D_n &= \mu_n \cdot V_t \\ D_p &= \mu_p \cdot V_t \end{aligned} \quad (1.16)$$

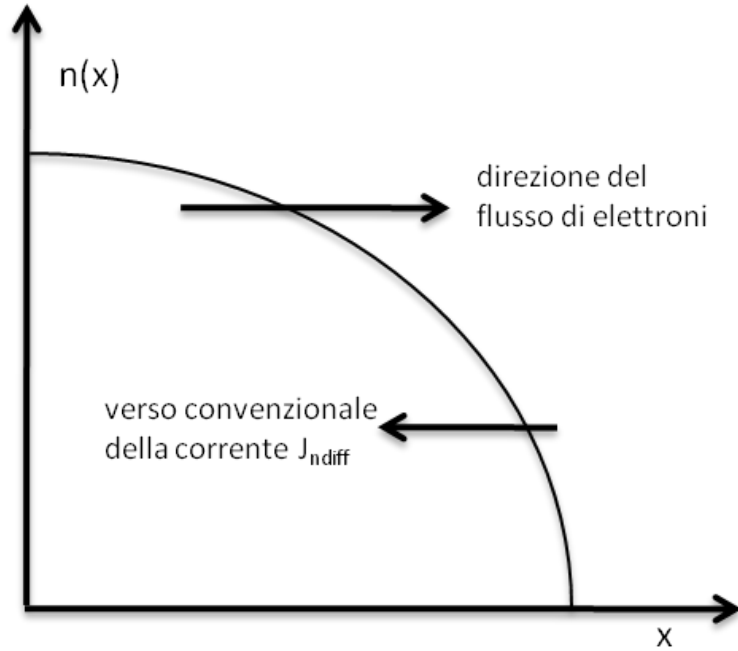


Figura 1.9 Corrente di diffusione per un profilo di concentrazione arbitrario

dove con V_t si è indicato un parametro statistico, detto **tensione termica** o **equivalente in tensione della temperatura**, dato da

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q} \cong \frac{T}{11600} \quad (1.17)$$

dove k è la costante di Boltzmann, q la carica dell'elettrone e T la temperatura espressa in gradi Kelvin.

La tensione termica ricorre spesso nelle equazioni che riguardano i semiconduttori, in particolare il suo valore a 300K, $V_t(300) = 25mV$ va assolutamente ricordato.

Tornando alle correnti di diffusione possiamo concludere che, se in un semiconduttore è presente un gradiente nella concentrazione dei portatori di carica, allora è presente una corrente di diffusione data, nella sua forma generale, dalla somma delle componenti dovute agli elettroni e alle lacune:

$$J_{diff} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.18)$$

Questa corrente è indipendente dalla presenza di campi elettrici e, quindi, da eventuali differenze di potenziale applicate al materiale. Qualora, invece, i campi elettrici, siano presenti, alle componenti di corrente diffusione si sovrappongono le componenti di corrente ohmica e le espressioni delle correnti di elettroni e di lacune diventano:

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \\ J_p &= q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (1.19)$$

mentre la corrente totale circolante nel semiconduttore sarà data dalla somma di tutte le varie componenti

$$J = J_n + J_p = J_{ndrift} + J_{ndiff} + J_{pdift} + J_{pdiff} \quad (1.20)$$

1.6 Drogaggio disuniforme

Nel paragrafo precedente non ci siamo posti il problema di come possa generarsi una concentrazione disuniforme di cariche elettriche. Per comprenderlo è necessario qualche accenno alla tecnologia di realizzazione dei dispositivi elettronici. Il silicio cristallino viene ottenuto attraverso un complesso processo di purificazione della quarzite (una particolare sabbia), che contiene il silicio sotto forma di ossido, SiO_2 . Nell'ultima fase tale processo prevede la solidificazione controllata del silicio fuso, grazie alla quale si ottengono dei lingotti di materiale perfettamente cristallino, di forma cilindrica, dai quali vengono poi tagliate le fette (*wafers*) su cui vengono fabbricati i dispositivi elettronici (Fig.1.10).

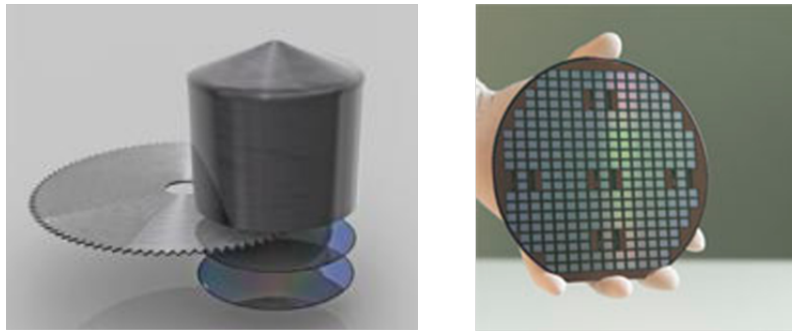


Figura 1.10 Lingotto e fetta di silicio

Per ottenere il silicio drogato, l'elemento drogante viene disciolto in quantità controllate all'interno della massa fusa, così che i lingotti prodotti sono di tipo n o di tipo p con un'assegnata concentrazione di drogante. Con

questa tecnica il drogante si distribuisce in maniera uniforme nel cristallo e si ottiene un materiale perfettamente omogeneo.

La fabbricazione dei dispositivi elettronici avviene modificando ulteriormente, ma in maniera localizzata, il drogaggio dei substrati di silicio; questa operazione si effettua attraverso due possibili tecniche, la prima, detta di **impiantazione ionica**, consiste nello sparare gli atomi droganti all'interno del silicio mediante acceleratori di particelle; la seconda, detta **diffusione termica**, sfrutta il fatto che a temperature intorno ai mille gradi le particelle di gas presenti nell'ambiente penetrano all'interno dei materiali, per cui, esponendo in opportuni forni una fetta di silicio ad un'atmosfera contenente un composto gassoso del drogante, si ha la penetrazione di quest'ultimo all'interno del cristallo. Entrambe le tecniche accennate agiscono sulla superficie della fetta di silicio nel senso che, a fronte di uno spessore tipico di un wafer, che è di circa 300 micrometri (μm), viene modificato il drogaggio soltanto nei primi μm o frazioni di μm . La cosa interessante, come sarà più chiaro nel prosieguo del libro, è che in un substrato, per esempio di tipo n, è possibile creare una regione superficiale di tipo p e viceversa, oppure una regione superficiale dello stesso tipo del substrato ma con una concentrazione di drogaggio maggiore.

Supponiamo di aver realizzato una situazione del genere cioè una fetta di silicio tutta di tipo n (o p) ma con la superficie molto più drogata. Ci troviamo in un caso come quello descritto nella Fig.1.9 del paragrafo precedente, in cui la concentrazione degli atomi droganti è disuniforme e, poiché ad ogni atomo drogante corrisponde un portatore di carica libero, anche la concentrazione delle cariche libere è variabile, dando luogo alla circolazione della corrente di diffusione. Ci chiediamo se, in assenza di tensioni applicate dall'esterno, questa corrente possa permanere indefinitamente o se esiste un qualche meccanismo che l'arresta.

Poiché stiamo parlando di un materiale non collegato ad alcun circuito esterno, la corrente netta circolante nel materiale deve essere nulla. Si potrebbe allora pensare che esiste un transitorio durante il quale i portatori liberi si ridistribuiscono nel materiale fino a che la loro concentrazione diventa uniforme, esattamente come farebbe un gas in un ambiente, annullando così il gradiente di concentrazione e la relativa corrente di diffusione. In realtà bisogna ricordare che quando un elettrone (o una lacuna) si libera, l'atomo dal quale si allontana diventa uno ione, di segno opposto, che rimane vincolato a restare nella sua posizione reticolare (cfr.1.4). Questo significa che, quando come in Fig.1.11 gli elettroni si spostano verso destra per effetto della diffusione, lasciano dietro di loro un egual numero di cariche positive.

Nel materiale si manifesta uno squilibrio di cariche e la conseguente nascita di un campo elettrico, E , il cui verso tende a riportare verso sinistra gli elettroni che si sono allontanati per diffusione.

In altri termini, in assenza di tensioni esterne applicate, la corrente di diffusione viene bilanciata da una corrente di trasporto di segno contrario. Si stabilisce cioè un equilibrio dinamico in cui le correnti di diffusione e di

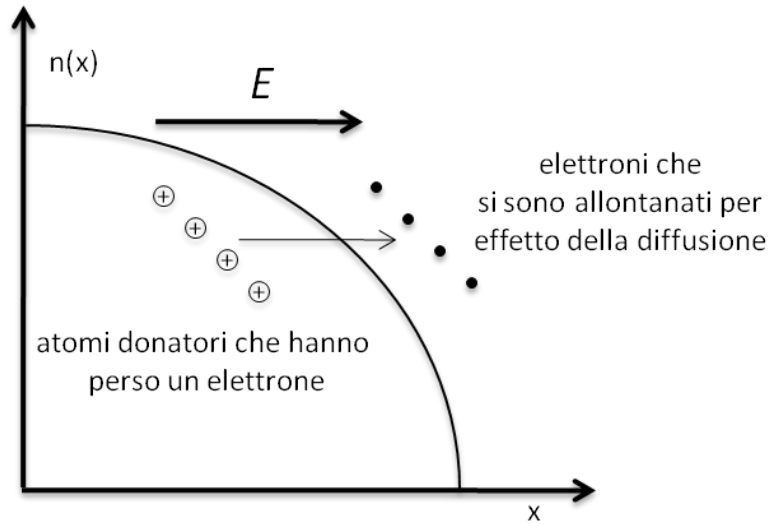


Figura 1.11 Formazione del campo elettrico in un semiconduttore drogato in maniera disuniforme

trasporto sono individualmente diverse da zero ma la corrente totale, data dalla somma delle due (ognuna con il proprio segno) è nulla. Formalmente si pu scrivere

$$J_n = q\mu_n n E + qD_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad (1.21)$$

dalla quale si può ricavare il valore del campo elettrico che nasce come conseguenza della disuniformità di drogaggio

$$E = -\frac{D_n}{\mu_n n} \frac{dn}{dx} = -\frac{V_t}{n} \frac{dn}{dx} \quad (1.22)$$

dove si è usata la relazione di Einstein per sostituire alla diffusività la tensione termica. Ovviamente analoghe relazioni sussistono nel caso in cui nel semiconduttore sia presente una concentrazione di lacune $p(x)$ variabile. In particolare si ha che, in assenza di tensioni applicate dall'esterno,

$$J_p = q\mu_p p E - qD_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad (1.23)$$

e

$$E = \frac{D_p}{\mu_p p} \frac{dp}{dx} = \frac{V_t}{p} \frac{dp}{dx} \quad (1.24)$$

1.7 Iniezione di portatori

Oltre che per effetto di un drogaggio disuniforme ci sono altre possibili cause che provocano la nascita di una distribuzione disuniforme dei portatori liberi. Per esempio, è sufficiente esporre il materiale semiconduttore alla luce solare (su questo principio si basa il funzionamento delle celle fotovoltaiche), infatti, parte dei fotoni incidenti possiedono energia sufficiente per rompere i legami covalenti del silicio e quindi generare coppie elettrone-lacuna.

L'assorbimento della luce da parte del materiale avviene molto superficialmente, per cui sulla faccia esposta alla radiazione luminosa si crea un eccesso di elettroni e lacune, rispetto a quelli presenti più in profondità, che porta all'instaurarsi della corrente di diffusione. Diversamente dal caso del drogaggio disuniforme questa volta non nasce alcun campo elettrico perché diffondono contemporaneamente sia elettroni che lacune che si bilanciano punto per punto, inoltre la corrente totale è nulla perché le due correnti hanno verso opposto.

Immaginiamo adesso di seguire un elettrone lungo il suo cammino verso l'interno del materiale. Nel momento in cui viene colpito dal fotone l'elettrone acquisisce un'energia iniziale almeno pari ad 1.1 eV (altrimenti il legame non si rompe) ed inizia a muoversi in maniera disordinata, ma con una direzione statistica preferenziale verso le regioni a minore concentrazione. Interagendo con il reticolo cristallino prima o poi l'elettrone perde l'energia iniziale e viene catturato da un atomo di silicio che lo intrappola in un nuovo legame covalente, si dice che l'elettrone **si ricombina**. Il tempo medio che un elettrone permane nello stato libero prima di ricombinarsi viene detto **tempo di vita medio di ricombinazione** o semplicemente tempo di vita medio o **lifetime di ricombinazione**; il simbolo che si utilizza per indicarlo è τ . È evidente che, affinché un elettrone si ricombini, è necessario che l'atomo che lo cattura disponga di un legame non soddisfatto, cioè di una lacuna; quando sparisce un elettrone, quindi, sparisce anche una lacuna, si parla, per questo, di ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna. Prima di ricombinarsi l'elettrone ha il tempo di percorrere una certa distanza all'interno del semiconduttore che viene detta **cammino libero medio** o **lunghezza di diffusione** e viene indicata con L_n , essa è legata al *lifetime* ed alla diffusività secondo la relazione

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (1.25)$$

Per le lacune esistono definizioni e relazioni simmetriche rispetto a quelle appena scritte, per cui L_p è la lunghezza di diffusione delle lacune ed è legata al tempo di vita medio delle lacune, τ_p , dalla relazione

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (1.26)$$

In una situazione come quella della esposizione alla radiazione luminosa, in cui esiste una sorgente di cariche libere localizzata sulla superfi-

cie che da l diffondono verso l'interno dando luogo ad un profilo di concentrazione variabile nel semiconduttore, si dice che i portatori vengono **iniettati** nel silicio (vedi Fig.1.12).

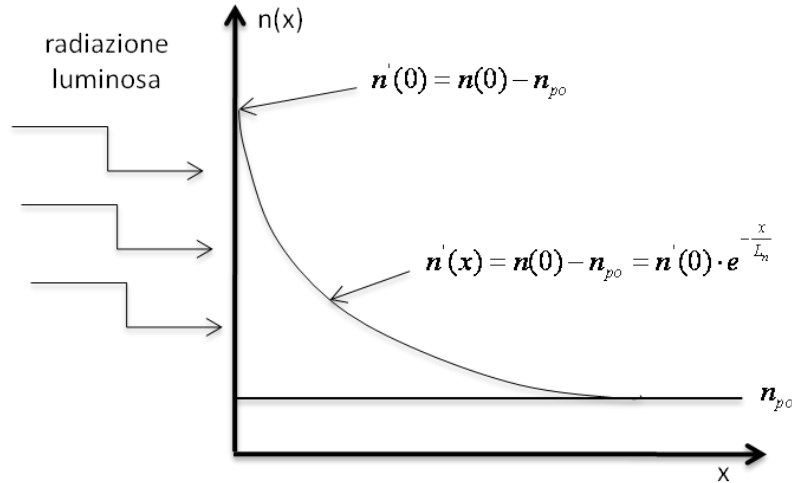


Figura 1.12 Iniezione di portatori all'interno di un semiconduttore

È possibile dimostrare che l'andamento della concentrazione dei portatori minoritari iniettati in un semiconduttore è descritto, con riferimento agli elettroni, dalla seguente legge esponenziale

$$n'(x) = n'(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_n}} \quad (1.27)$$

dove l'apice sta ad indicare che ci si sta riferendo soltanto ai portatori in eccesso cioè

$$n'(x) = n(x) - n_{po} \quad (1.28)$$

Poichè in un semiconduttore di tipo p la concentrazione n_{po} degli elettroni è molto piccola, nei casi pratici è quasi sempre vero che

$$n'(x) \cong n(x) \quad (1.29)$$