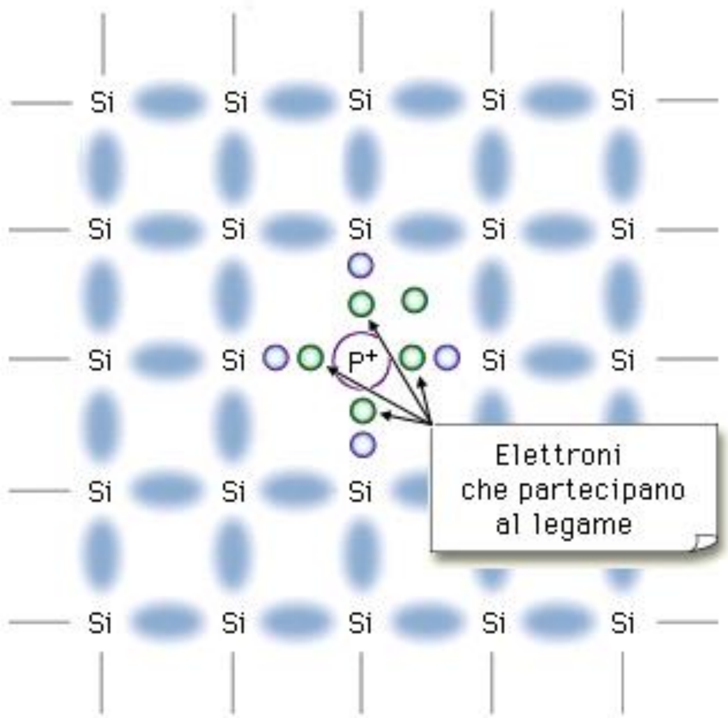
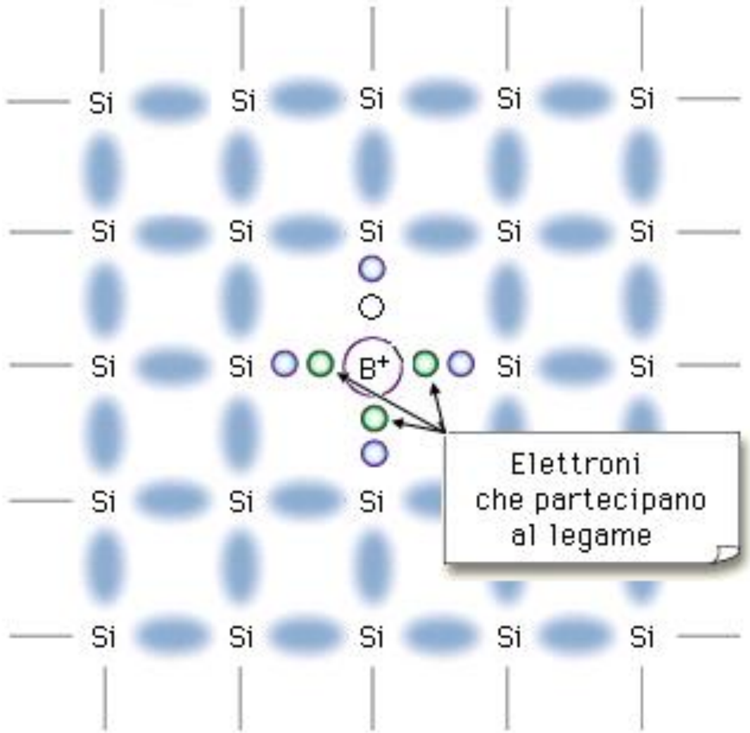
Il caso dei semiconduttori estrinseci

Drogaggio nei semiconduttori





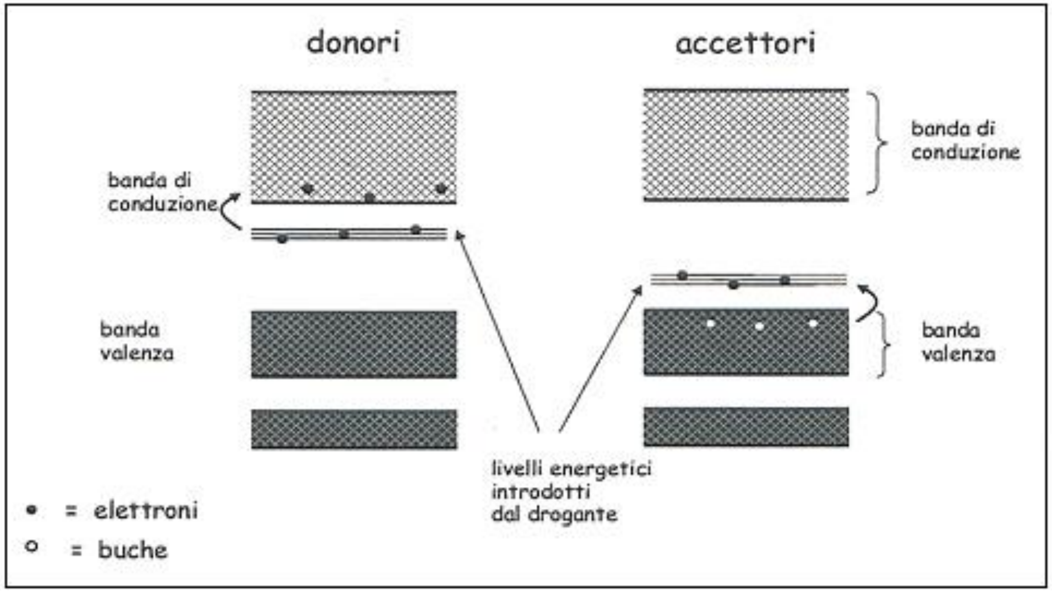
Drogaggio di tipo n

con Fosforo pentavalente

Drogaggio di tipo p

con Boro trivalente

Droggaggio nei semiconduttori



- Introducendo dei donori di elettroni si creano dei livelli energetici nuovi nella gap proibita, proprio sotto al bottom della banda di conduzione → ad una temperatura non nulla, gli elettroni che popolano questi nuovi livelli passano nella banda di conduzione (eccesso di elettroni)
- Se invece si introducono degli accettori, i nuovi livelli energetici (vuoti) si creano nella gap sopra al top della banda di valenza, per cui l'aumento della temperatura sino ad un valore non nullo provoca il passaggio di elettroni dalla banda di valenza ai nuovi livelli (eccesso di buche)

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

Nei semiconduttori estrinseci **la concentrazione dei portatori dipende dalla concentrazione delle impurità droganti e dalla temperatura**.

Consideriamo ad esempio un semiconduttore drogato con **N_D atomi donori**, il cui **livello elettronico** giace a distanza **E_D** dal bordo della banda di conduzione.

$n=n_i+n_D$

In cui **n_D** è una **frazione di N_D** e corrisponde alle **impurità** che si sono **ionizzate**, ovvero che hanno realmente ceduto un elettrone

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

Temperature basse

- Non tutti i donori sono ionizzati, perciò alcuni livelli donore sono vuoti e altri pieni.

- Si dimostra che il livello di Fermi sarà compreso tra il livello dei donori e la banda di conduzione.

$$E_F = \frac{E_D + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{N_C}$$

$$n(T) = \sqrt{N_C N_D} \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right]$$

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

Temperature intermedie

- Se la T diventa più elevata, ma non troppo, tutti i droganti si ionizzano, per cui $n_D = N_D$
- La concentrazione dei portatori intrinseci è ancora trascurabile

$$E_F = E_C - kT \ln \frac{N_C}{N_D}$$

$$E_F = E_V + kT \ln \frac{N_V}{N_A}$$

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

Temperature elevate

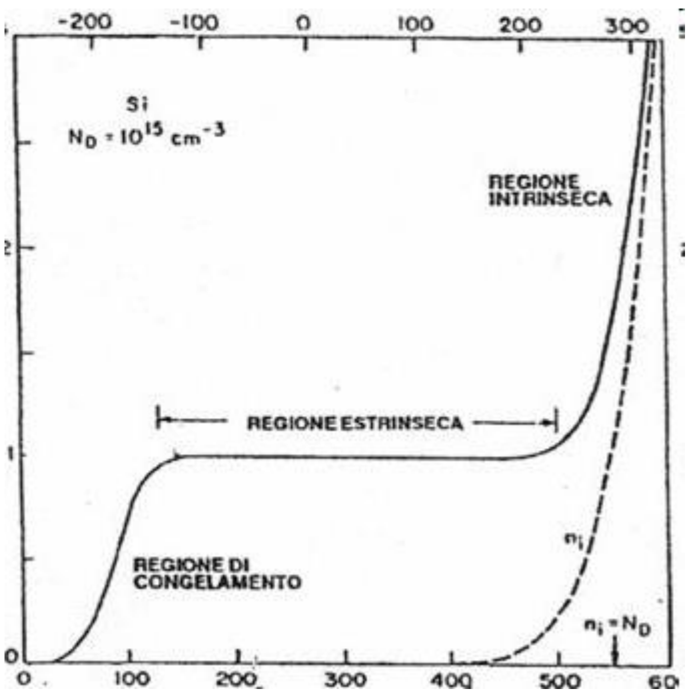
- Se T aumenta ancora, tutti i droganti sono ionizzati, per cui $n_D = N_D$
- Ma **aumenta in maniera considerevole anche la concentrazione di portatori intrinseci**, che diventa confrontabile con n_D
- Se T aumenta ancora $\mathbf{n_i >> N_D}$

$$n = n_i(T) + N_D \approx n_i$$

$$p = n_i$$

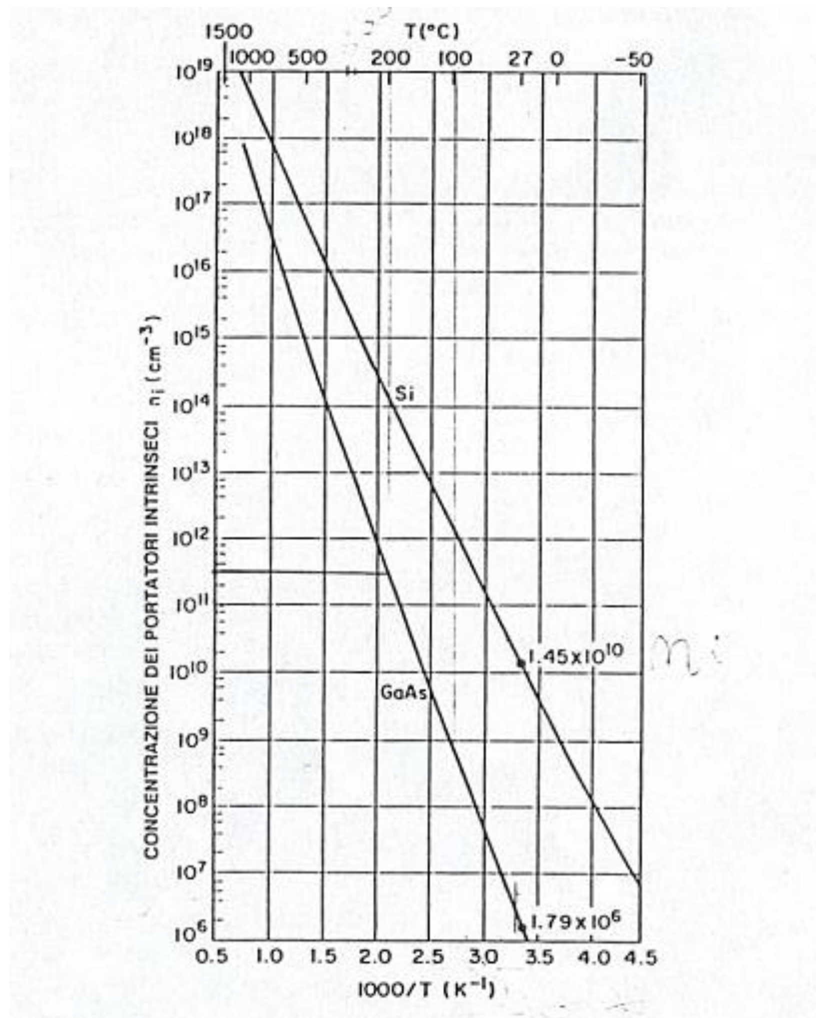
- Il livello di Fermi si sposta nuovamente verso il centro del Band Gap

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)



Andamento della concentrazione degli elettroni rispetto a T in silicio drogato

con $N_D = 10^{15}$ cm^{-3}



Concentrazione dei portatori intrinseci nel Si e nel GaAs in funzione del reciproco della temperatura.[4]

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

Considerando adesso le espressioni di **n(T) e di p(T)** in funzione delle concentrazioni dei livelli energetici in banda di conduzione e in banda di valenza, si nota che il loro **prodotto dipende solo da T e dall'energy gap**, ma **NON** dalla posizione del **livello di Fermi.**

Questo ha una importantissima conseguenza, visto che è **generalizzabile anche ai semiconduttori estrinseci**:

$$p(T)n(T) = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{kT}\right] N_V \exp\left[\frac{E_V - E_F}{kT}\right] =$$

$$= N_C N_V \exp\left[-\frac{E_G}{kT}\right] = n_i^2$$

$$n_i^2 = p(T)n(T)$$

Legge di azione di massa

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

$$p(T)n(T) = n_i^2 \Rightarrow p(T) = \frac{n_i^2}{n(T)}$$

A seconda del drogaggio, con Nd (o Na), i portatori di maggioranza saranno elettroni (o lacune) e quelli di minoranza lacune (o elettroni)

$$n(T) = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{kT}\right] = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_i}{kT}\right]\exp\left[\frac{E_F - E_i}{kT}\right]$$

$$n(T) = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_i}{kT}\right] \qquad (114)$$

$$n_i = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_i}{kT}\right]$$

Densità di elettroni e lacune (estrinseci)

$$p(T) = N_V \exp\left[-\frac{E_F - E_V}{kT}\right] = N_V \exp\left[-\frac{E_i - E_V}{kT}\right] \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right]$$

$$p(T) = n_i \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right] \qquad (115)$$

$$n_i = N_V \exp\left[-\frac{E_i - E_V}{kT}\right] = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_i}{kT}\right]$$

Mobilità dei portatori al variare della temperatura

La mobilità dei semiconduttori

Abbiamo già visto cosa si intende per mobilità nei semiconduttori.

Occorre però precisare che vanno definiti **due valori di mobilità, uno per ogni tipologia di portatori**.

Determiniamo la mobilità uguagliando l'impulso (forza x tempo) alla quantità di moto del portatore durante l'intervallo che intercorre tra due urti:

$$e\vec{E}\tau_{e,h} = m_{e,h}\vec{v}_{e,h} \tag{116}$$

$$\vec{v}_{e,h} = \mu_{e,h}\vec{E} \qquad\qquad \sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

$$\mu_{n,p} = \frac{e\tau_{n,p}}{m^*_{n,p}} \tag{117}$$

La mobilità dei semiconduttori

Poichè **la mobilità dipende dal tempo di rilassamento**, ovvero dagli urti → **entra in gioco la** dipendenza della loro frequenza dalla **Temperatura.**

Che tipologie di urti può subire un portatore?

- contro il reticolo
- contro le impurità droganti
- contro difetti (non le consideriamo)

Queste collisioni <u>limitano la velocità</u> che il portatore può acquisire a causa del campo elettrico.

La mobilità dei semiconduttori

A seconda del tipo di collisione **si definiscono due tempi caratteristici**, uno riguardante gli urti con il reticolo e uno gli urti con le impurità.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{imp}} + \frac{1}{\tau_{vibr}} \qquad (118)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{imp}} + \frac{1}{\mu_{vibr}} \qquad (119)$$

La mobilità dei semiconduttori

Lo scattering dovuto agli urti con il reticolo è dovuto alle **vibrazioni termiche (fononi)**, presenti per qualsiasi T superiore allo zero assoluto.

- L'entità di tali vibrazioni aumenta all'aumentare della T
- la mobilità decresce all'aumentare di T

Tale fenomeno è predominante a T elevate

$$\mu_{vibr} \propto T^{-\frac{3}{2}}$$

La mobilità dei semiconduttori

Scattering da impurità

Le impurità possono essere neutre o **cariche.**

In quest'ultimo caso influiscono sulla mobilità (**scattering**)

D'altra parte lo stato di ionizzazione dei droganti dipende dalla temperatura.

Perciò **a temperature non troppo elevate, può accadere** (dipende anche ovviamente dalla concentrazione dei droganti!) **che domini questo effetto**.

La mobilità dei semiconduttori

Al crescere della temperatura,

- la velocità termica degli elettroni aumenta
- il tempo trascorso nelle vicinanze degli ioni droganti diminuisce

Per questo motivo, **quando domina lo scattering da impurità, la mobilità cresce al crescere della temperatura.**

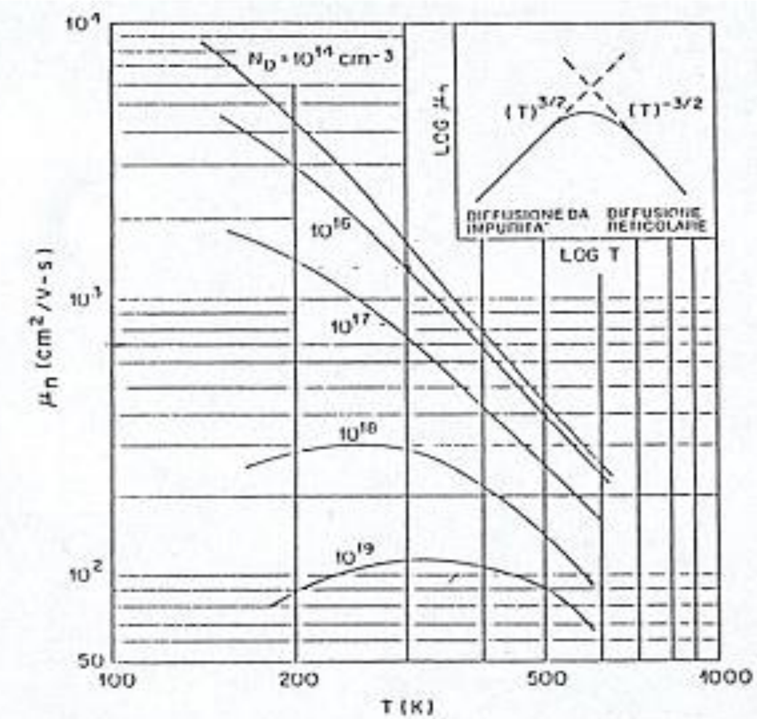
La mobilità dei semiconduttori

- A **T ambiente e superiori**, domina l'effetto delle **vibrazioni reticolari (fononi)** (mobilità decresce all'aumentare di T)

- A **basse temperature lo scattering da impurità**, mobilità cresce all'aumentare di T

$$\mu_{imp} \propto \frac{1}{N_t} T^{\frac{3}{2}} \qquad (120)$$

$$\mu_{vibr} \propto T^{-\frac{3}{2}}$$

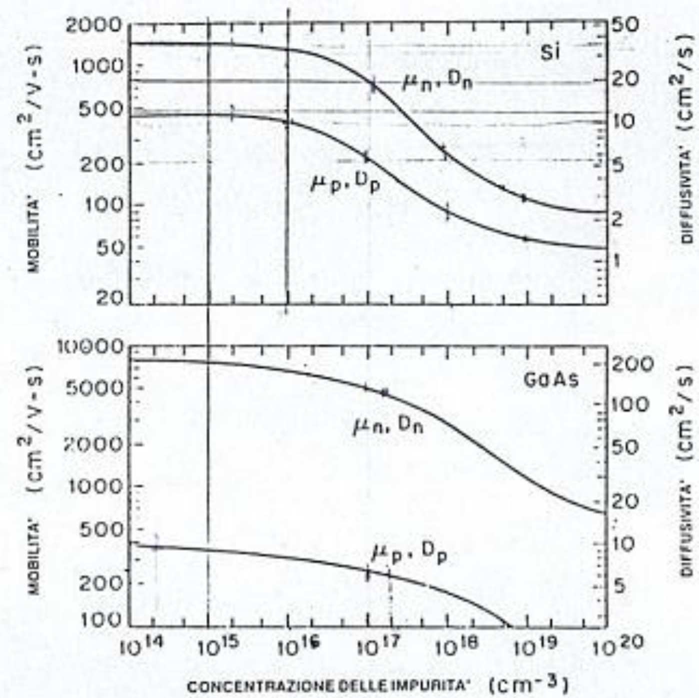


Mobilità degli elettroni nel silicio in funzione della temperatura per diverse concentrazioni di donatori. L'inserto mostra la dipendenza teorica dalla temperatura della mobilità degli elettroni.[4]

Effetto di campi elettrici elevati

In generale, fissata la temperatura si può osservare che la **mobilità dei portatori decresce all'aumentare della concentrazione delle impurità** (maggiore scattering)

Si osservi inoltre che in media la **mobilità degli elettroni è sempre maggiore di quella delle lacune** (la massa efficace degli elettroni è minore!)



Mobilità e diffusività nel Si e nel GaAs a 300 K in funzione della concentrazione delle impurità.[4,5]

Effetto sulla resistività

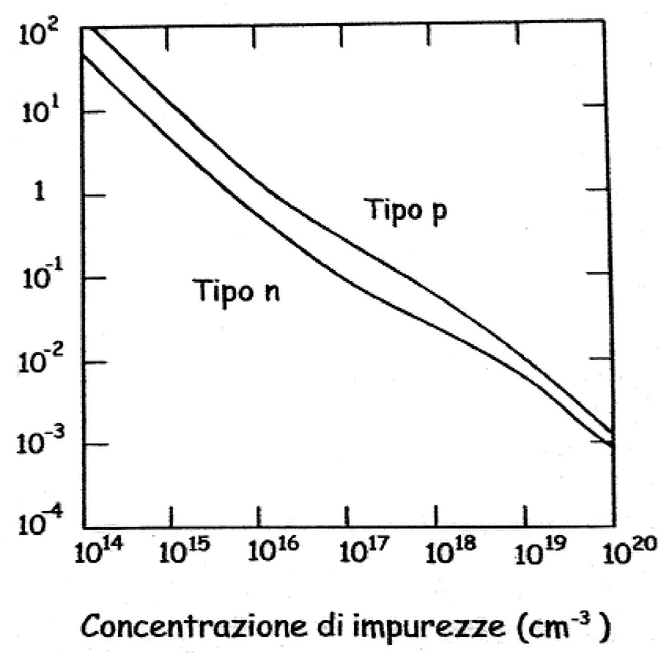
Resistività in funzione della concentrazione dei droganti

È vero che la mobilità diminuisce all'aumentare della concentrazione dei droganti, ma non di ordini di grandezza

In sostanza domina l'aumento della concentrazione, per cui la resistività diminuisce

$$\rho_n = \frac{1}{ne\mu_n}$$

$$\rho_p = \frac{1}{pe\mu_p}$$



Equazione di continuità

Diffusione

Il campo Elettrico non è l'unica causa possibile del moto dei portatori.

Frequentemente, nei dispositivi elettronici, si producono dei **gradienti nella concentrazione dei portatori**, ovvero **il profilo di concentrazione non è costante** ma varia lungo una certa direzione x (oppure in tutte le direzioni).

Questo gradiente da origine ad un fenomeno fisico molto comune detto **diffusione**, che consiste nella produzione di una **corrente di portatori che si muovono dalla zona in cui sono più concentrati alla zona in cui sono meno concentrati.**

Diffusione

Legge di Fick: il flusso molecolare in ogni punto è proporzionale alla variazione di concentrazione per unità di percorso nella direzione in cui tale variazione è massima ed ha verso opposto a quello in cui diminuiscono le concentrazioni.

$$\frac{dm}{dt} = -DA\frac{dc}{dx}$$

Legge di Fick

D = coefficiente di diffusione $[D] = [\mathrm{cm}]^2\ [\mathrm{sec}]^{-1}$
A = area della sezione $[A] = [\mathrm{cm}]^2$

Il segno negativo si giustifica in quanto **le molecole si spostano nel verso in cui diminuiscono le concentrazioni**, e poiché dc/dx risulterebbe negativo, per ottenere un flusso positivo (nella direzione delle x crescenti) è necessario anteporre alla formula il segno negativo.

Diffusione

Vediamo ora come si esprimono le componenti di corrente dovute al processo di diffusione dei portatori

Si dimostra che **la corrente corrispondente ad un moto di diffusione** è espressa dalla seguente relazione:

$$J_n = (-e) D_n \left(-\frac{dn}{dx}\right) = e D_n \frac{dn}{dx} \qquad (121)$$

Legge di Fick

$$J_p = (+e) D_p \left(-\frac{dp}{dx}\right) = -e D_p \frac{dp}{dx} \qquad (122)$$

Le due correnti sono proporzionali alla derivata spaziale delle concentrazioni di portatori (si veda lo Sze)

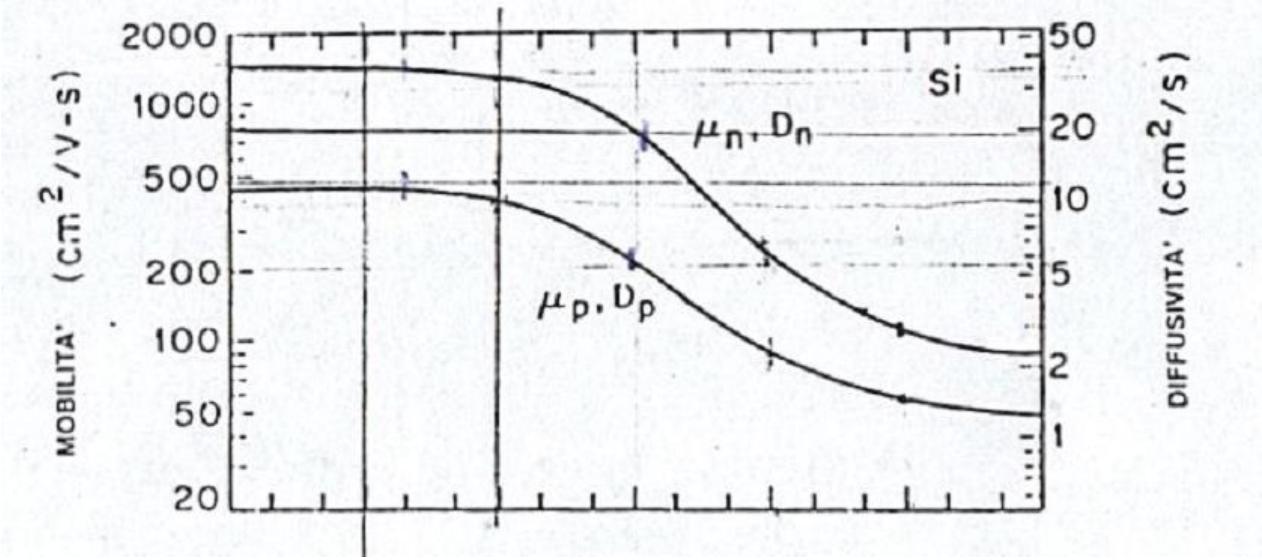
D rappresenta il coefficiente di diffusione del portatore.

Si misura in cm^2/s

Diffusione

Tale grandezza dipende dalla massa efficace e dal tempo libero medio tra un urto e l'altro

$$D = \frac{kT}{e}\mu \qquad \text{Relazione di Einstein} \qquad (123)$$



Per la dimostrazione della relazione di Einstein si veda il capitolo 2 dello Sze

Diffusione

In generale è presente sia un campo elettrico che un gradiente di concentrazione

la densità di corrente complessiva è data da:

$$J_n = e\mu_n nE + eD_n \frac{dn}{dx} \qquad (123)$$

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \frac{dp}{dx} \qquad (124)$$

$$J_{tot} = J_n + J_p = e\mu_n nE + eD_n \frac{dn}{dx} + e\mu_p pE - eD_p \frac{dp}{dx} \qquad (125)$$

Condizioni di fuori equilibrio

Consideriamo adesso il caso di semiconduttori in cui la **concentrazione dei portatori sia variata dall'esterno,** a causa di diversi tipi di meccanismi.

Ad esempio si possono iniettare nel semiconduttore dei portatori, connettendolo ad un **generatore elettrico esterno**

Oppure illuminandolo con una luce opportuna.

In tal caso, **la legge di azione di massa non vale più e il sistema è "fuori equilibrio"** → $np > n_i^2$

Nei semiconduttori fuori equilibrio si instaurano dei meccanismi che tendono a riportare il sistema in equilibrio.

Condizioni di fuori equilibrio

In entrambi i modi detti prima, degli **elettroni in banda di valenza** possono acquisire l'energia necessaria per **saltare in banda di conduzione**.

In questo modo **si creano** simultaneamente delle **coppie elettrone-lacuna.**

È anche possibile che la carica invece che essere generata **sia eliminata** attraverso dei processi di **ricombinazione** (passaggio di elettroni da BC a BV con la conseguente eliminazione di 1e e di 1h).

Condizioni di fuori equilibrio

Fuori equilibrio, la concentrazione dei portatori è regolata da un'equazione detta equazione di continuità per i minoritari

Perché?

Perché sono i soli portatori la cui concentrazione è così bassa che queste variazioni siano significative

La concentrazione dei maggioritari non viene alterata in maniera significativa

Condizioni di fuori equilibrio

Si consideri una porzione lunga dx di semiconduttore di tipo n avente sezione costante A.

Consideriamo l'ingresso di lacune in questa fetta di materiale: **possiamo mettere in relazione l'eventuale variazione della concentrazione di portatori con la corrente**.

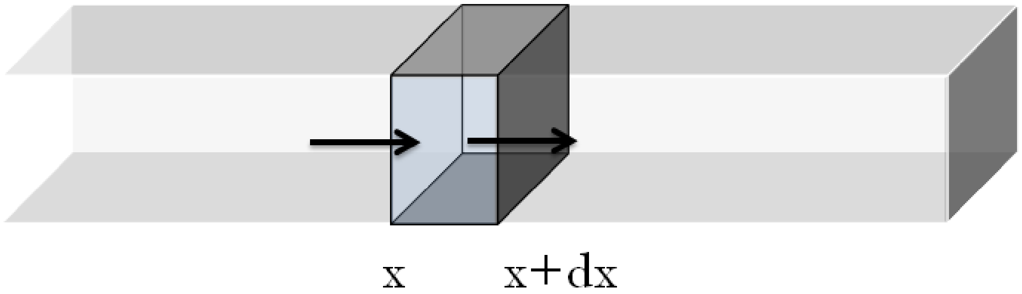
Perciò, all'equilibrio termico, considerando in ingresso (Ip) e in uscita (Ip+dIp). Si avrà una variazione di lacune nel tempo data da:

$$\frac{dp_n}{dt} = -\frac{dI_p}{e}\frac{1}{Adx} = -\frac{1}{e}\frac{dJ_p}{dx} \qquad (126)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = +\frac{dI_n}{e}\frac{1}{Adx} = +\frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx} \qquad (127)$$

Condizioni di fuori equilibrio

Spieghiamo meglio *(Esempio lacune in un semiconduttore n)*

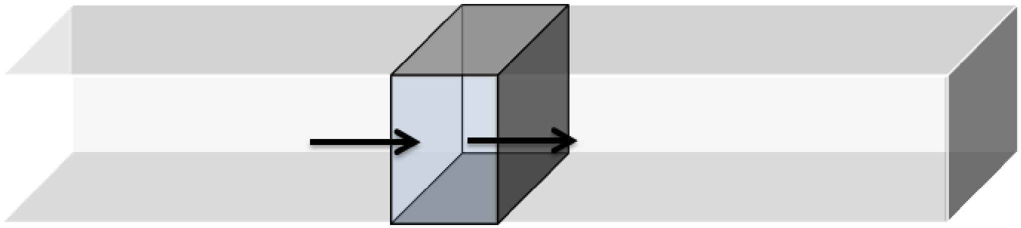


Consideriamo il numero di lacune netto nell'unità di volume:

$$\frac{dp_n}{dt} qAdx = \left[I_p(x) - I_p(x+dx) \right]$$

Per il principio di conservazione della carica, la variazione nel tempo del numero di lacune in un volume Adx deve essere uguale alla differenza di corrente ($I_{entrante} - I_{uscente}$)

Condizioni di fuori equilibrio



$$\frac{dp_n}{dt} qAdx = \left[I_p(x) - I_p(x+dx) \right]$$

$$\frac{dp_n}{dt} = -\frac{1}{q}\frac{1}{A}\frac{I_p(x+dx) - I_p(x)}{dx} = -\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} \qquad (126)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = \left[-\frac{1}{q} J_n(x) + \frac{1}{q} J_n(x+dx) \right] \frac{1}{dx}$$

$$\frac{dn_p}{dt} = \frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} \qquad (127)$$

Equazioni di continuità

Queste equazioni possono essere generalizzate, **includendo tutti i possibili fenomeni di generazione e ricombinazione di carica**.

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - U_p - \frac{1}{e}\frac{dJ_p}{dx} \qquad (128)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - U_n + \frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx} \qquad (129)$$

Gp e Gn rappresentano i tassi di generazione dei portatori, ovvero il numero di portatori prodotti nell'unità di tempo e nell'unità di volume.

Un e Up rappresentano i tassi di ricombinazione di elettroni e lacune.

Equazioni di continuità

Si dimostra che essi sono esprimibili come:

$$U_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \tag{130}$$

$$U_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \tag{131}$$

Con $\tau_{n,p}$ tempo di vita medio di un minoritario.

Se ora sostituiamo l'espressione di J, le equazioni diventano:

$$J_n = e\mu_n nE + eD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \frac{dp}{dx}$$

Equazioni di continuità

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - U_p - \mu_p p_n \frac{dE}{dx} - \mu_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2}$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - U_n + \mu_n n_p \frac{dE}{dx} + \mu_n E \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2}$$

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \mu_p p_n \frac{dE}{dx} - \mu_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} \qquad (134)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \mu_n n_p \frac{dE}{dx} + \mu_n E \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} \qquad (135)$$

Le equazioni di continuità rappresentano un **bilancio delle popolazioni di elettroni e lacune**.

La variazione nel tempo della loro concentrazione è pari al tasso netto di ricombinazione (ovvero bilancio di generazione e ricombinazione), più la variazione di carica causata dal flusso di portatori che costituisce la densità di corrente.

Esercizio

Calcolare la conducibilità di un semiconduttore (ad esempio silicio) nel caso intrinseco a T ambiente.

Ipotizziamo che la mobilità degli elettroni , $\mu n = 1500$ [cm 2 /(V·sec)], e $\mu p = 500$ [cm 2 /(V·sec)]

Dato un provino di materiale semiconduttore (Silicio) con le seguenti caratteristiche :
lunghezza $L = 3$ [mm] , $A = 50x100$ [μm^2], concentrazione di Drogante (donatore) $N_D = 5 \cdot 10^{14}$ [cm −3] a temperatura ambiente (300 K). Sapendo che dopo aver applicato un campo elettrico stazionario ai capi esso è attraversato da una corrente $I = 1\ \mu A$, calcolare la σ e il potenziale V relativo al campo elettrico applicato.

Un campione in Silicio è drogato con $N_D = 1 \times 10^{14}\ cm^{-3}$

- Determinare la resistività
- Determinare la posizione del livello di Fermi