TIPI DI MATERIALI

MASTER CO...
Tel. 050 8312126
Cell. 338 9837745

I vari materiali possono essere suddivisi sulla base della loro resistività elettrica.

resistività ← $\rho = \frac{1}{\sigma}$ → conducibilità

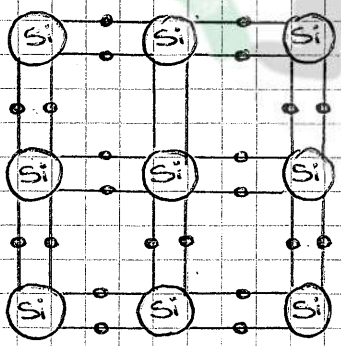
- ISOLANTI: conducibilità molto bassa ($\rho > 10^5\ \Omega cm$)
- CONDUTTORI: conducibilità molto alta ($\rho < 10^{-2}\ \Omega cm$)
- SEMICONDUTTORI: conducibilità intermedia ($10^{-2}\ \Omega cm < \rho < 10^5\ \Omega cm$)

SILICIO INTRINSECO (PURO)

Il silicio (Si) è un elemento del gruppo IV della tavola periodica, ciò vuol dire che ha 4 elettroni nel guscio di valenza che possono essere condivisi con altri atomi di silicio per formare un reticolo cristallino; è il semiconduttore più utilizzato al momento.

Un cristallo di silicio puro (intrinseco) ha una struttura ordinata nella quale gli atomi di silicio sono collocati in un reticolo e mantenuti in posizione da legami covalenti formati dai 4 elettroni di valenza di ciascun atomo.

LEGAME COVALENTE → legame chimico in cui 2 atomi mettono in comune delle coppie di elettroni, ciò avviene perché gli atomi tendono al minor dispendio energetico possibile, ottenibile con la stabilità della loro configurazione elettronica.



A temperature sufficientemente basse ($T = 0K$) tutti i legami covalenti sono intatti e non ci sono elettroni liberi, utilizzabili per la conduzione.

Al crescere della temperatura ($T > 0K$), l'energia termica diventa sufficiente a spezzare alcuni legami covalenti e a rendere liberi alcuni elettroni, che muovendosi all'interno del cristallo possono contribuire alla conduzione.

Gli elettroni che si muovono nel cristallo vedono un potenziale periodico dovuto ai nuclei atomici e agli elettroni ad essi legati; il loro comportamento è equivalente a quello di "quasi-particelle" che si spostano nel vuoto, ma che possiedono una massa, detta "MASSA EFFICACE", diversa da quella del vuoto.

Quando un elettrone diventa libero, al suo posto rimane un LACUNA (BUCA) che equivale in un certo senso ad una carica positiva, tale lacuna può essere riempita da un elettrone liberatosi da un legame covalente vicino, che a sua volta crea una nuova lacuna e così via.

Quindi anche le lacune possono comportarsi come cariche libere e trasportare corrente; possono essere trattate come quasi-particelle con carica opposta a quella di un elettrone e massa efficace leggermente diversa.

PORTATORI DI CARICA → particelle mobili dotate di carica, soltamente carica elettrica

- Elettroni: hanno carica negativa e si muovono nella direzione di campo elettrico/corrente, ma con verso opposto
- Lacune: hanno carica positiva e si muovono in direzione e verso uguali al campo elettrico/corrente.

IONIZZAZIONE TERMICA → processo che comporta la rottura di un legame covalente generando la coppia elettrone/lacuna.

RICOMBINAZIONE → processo inverso con cui la coppia lacuna/elettrone si uniscono a formare un nuovo legame.

All'equilibrio termico il tasso di ionizzazione è pari al tasso di ricombinazione (esiste un elettrone per ogni lacuna) perciò:

$$n = p = n_i$$

- n: concentrazione di Elettroni
- p: Concentrazione di Lacune
- n_i: Concentrazione Intrinseca: dipende dalle caratteristiche del materiale e dalla temperatura

Inoltre vale la legge di Azione di Massa: $np = n_i^2$

Nel silicio intrinseco si ha che se $T = 300K$ (temperatura ambiente)

$n_i = 1{,}5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$

densità atomica $= 5 \times 10^{22}$ atomi/cm^{-3}

quindi 1 atomo ogni 3×10^{12} risulta ionizzato.

MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

DRIFT o DERIVA

Poiché nei legami metallici gli elettroni sono fortemente delocalizzati, si possono muovere con una certa libertà.
A temperature superiori allo zero assoluto (0K) gli elettroni si muovono in direzioni casuali dovute all'agitazione termica.

Se gli elettroni si muovessero tutti nella stessa direzione si genererebbe una corrente, in realtà non si generano correnti perché la casualità del moto di ciascun elettrone fa in modo che la somma di tutte le velocità degli elettroni si annulla.

Il meccanismo di Drift consente il trasporto di portatori di carica in un semiconduttore, quando viene applicato un campo elettrico E che accelera le cariche libere disponibili in un semiconduttore

In assenza di meccanismi dissipativi, tali cariche verrebbero accelerate indefinitivamente fino a quando si trovano nella zona in cui il campo elettrico è non nullo.

Nella realtà però, i portatori subiscono urti anelastici con il reticolo dovuti alle fluttuazioni termiche e ad altre cause, perdendo così tutta l'energia cinetica acquisita e raggiungendo in modo pressochè immediato una velocità di Drift costante e proporzionale al campo elettrico applicato.

$\vec{v}_{drift} = \mu_n \vec{E}$ ➔ per gli elettroni

$\vec{v}_{drift} = \mu_p \vec{E}$ ➔ per le lacune

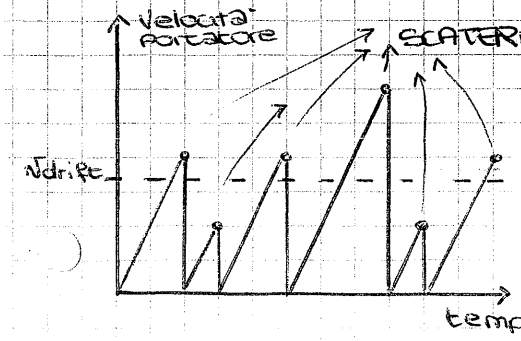
MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

dove:
μ_n COSTANTE DI MOBILITÀ degli ELETTRONI $[cm^2/Vs]$
μ_p COSTANTE DI MOBILITÀ delle LACUNE $[cm^2/Vs]$
$\vec{v}_{drift}$ VELOCITÀ DI DRIFT $[cm/s]$
$\vec{E}$ CAMPO ELETTRICO $[V/cm]$

In genere $\mu_n \cong 3\mu_p$ e valori tipici per il silicio intrinseco sono

$\mu_n \cong 1350\ cm^2/Vs$ $\mu_p \cong 480\ cm^2/Vs$

MODELLO DI DRUDE ➔ è un modello semplificato che riproduce il comportamento chimico dei semiconduttori

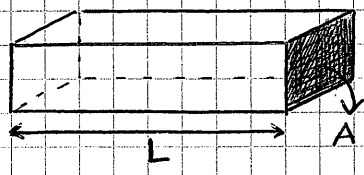


In presenza di un campo Elettrico E il portatore tende ad accelerare con un incremento lineare della velocità. Gli urti anelastici con il reticolo (SCATTERING) comportano una perdita quasi completa dell'energia cinetica acquisita dal portatore in seguito all'accelerazione dovuta al campo elettrico.

Immediatamente dopo ogni collisione, si può assumere che il portatore abbia una velocità "termica" (dovuta all'agitazione termica del reticolo cristallino) orientata in una direzione casuale.

L'andamento della velocità del portatore nel tempo, depurata della componente termica (isotropa ⇒ valor medio nullo), risulta a dente di sega e il suo valor medio è proporzionale al campo elettrico e indipendente dalla lunghezza del semiconduttore (ciò è vero se è sufficientemente grande rispetto alla distanza media percorsa dal portatore fra due eventi di scattering).

Consideriamo una barra di silicio nella quale sono presenti una concentrazione di lacune p e una di elettroni n, alla quale viene applicato un campo elettrico



la velocità di drift sarà pari alla velocità con cui un elettrone percorre L in un tempo t

$$\bar{v}_{drift} = \frac{L}{t} \rightarrow t = \frac{L}{\bar{v}_{drift}}$$

la corrente che si genera dipende dal numero di elettroni che si muovono per l'unità di tempo

$$I = \frac{Nq}{t} \rightarrow I = \frac{Nq\,\bar{v}_{drift}}{L}$$, N = numero di elettroni, $q = 1{,}6\times10^{-19}$ C

la corrente I è la densità di corrente J estesa a tutta la sezione del materiale

$$I = JA \rightarrow J = \frac{I}{A} = \frac{Nq\bar{v}_{drift}}{AL}$$

dove AL = volume $\rightarrow \frac{N}{AL} = n \rightarrow$ densità di elettroni

Quindi

$$\boxed{J_{n_drift} = nq\mu_n E}$$ DENSITÀ DI CORRENTE DI DRIFT PER GLI ELETTRONI

Analogamente si ha

$$\boxed{J_{p_drift} = pq\mu_p E}$$ DENSITÀ DI CORRENTE DI DRIFT PER LE LACUNE

Perciò

$$\boxed{J_{drift} = q(n\mu_n + p\mu_p)E}$$ DENSITÀ DI CORRENTE DI DRIFT TOTALE

$$\boxed{\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)}$$ CONDUCIBILITÀ

$$\boxed{J = \sigma E}$$ LEGGE MICROSCOPICA DI OHM

MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

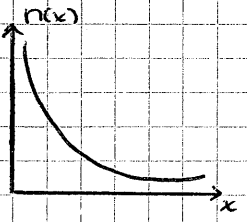
DIFFUSIONE

È un meccanismo che consente il trasporto di portatori di carica attraverso un semiconduttore ed è legato al moto casuale dei portatori dovuto all'agitazione termica.

In un cristallo con concentrazione di lacune e elettroni uniforme, il moto termico non porta ad alcun flusso netto di carica.

Se la concentrazione di un tipo di portatori viene resa maggiore in una regione del cristallo rispetto al resto, i portatori migreranno dalla zona a maggior concentrazione verso quella a minore, nel tentativo di ristabilire l'equilibrio; si crea quindi una corrente netta detta CORRENTE di DIFFUSIONE

Consideriamo una barra di silicio in cui la concentrazione di elettroni $n(x)$ non è uniforme.



Nasce una corrente di diffusione in direzione x, il cui valore è proporzionale in ogni punto alla derivata della concentrazione.

$$J_n = q D_n \frac{\partial n(x)}{\partial x}$$

Dove:

J_n DENSITÀ DI CORRENTE DI DIFFUSIONE DEGLI ELETTRONI $[A/cm^2]$
D_n COSTANTE DI DIFFUSIONE DEGLI ELETTRONI $[cm^2/s]$

NB: in questo esempio $\partial n(x)/\partial x$ è negativa e un flusso di elettroni in direzione positiva dà luogo ad una corrente negativa.

Nel caso sia presente una concentrazione $p(x)$ di lacune non uniforme si ha:

$$J_p = -q D_p \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

MASTER COPY
Tel. 050 8312126
Cell. 388 9837745

Dove:

J_p DENSITÀ DI CORRENTE DI DIFFUSIONE DELLE LACUNE $[A/cm^2]$
D_p COSTANTE DI DIFFUSIONE DELLE LACUNE $[cm^2/s]$

NB: in questo caso, un flusso di cariche positive in direzione positiva dà luogo ad una corrente di segno positivo e compare un segno (-) per compensare $\frac{\partial p(x)}{\partial x}$ negativa.

Valori tipici per il silicio intrinseco sono:

$$D_p = 12 \frac{cm^2}{s} \qquad D_n = 34 \frac{cm^2}{s}$$

RELAZIONE DI EINSTEIN →

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T$$

TENSIONE TERMICA →

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

a temperatura ambiente ($T = 300K$) $V_T \simeq 25 \div 26$ mV

, $k = 1{,}3806 \times 10^{-23}$ J/K COSTANTE DI BOLTZMANN