

MATERIALI PER L'ELETTRONICA

SEMICONDUTTORI

OBIETTIVO: Analizzare in modo principalmente qualitativo i principi su cui si basano i "mettoni fondamentali" dell'elettronica, ovvero i dispositivi elettronici.

I materiali per l'elettronica si trovano attorno al IV gruppo della tavola periodica degli elementi:

IIIB	IVB	VB	
B	C	N	O
Al	Si	P	S
Ga	Ge	As	Se
In	Sn	Sn	Te

- Fondamentali come elementi base:

IV gruppo: SILICIO

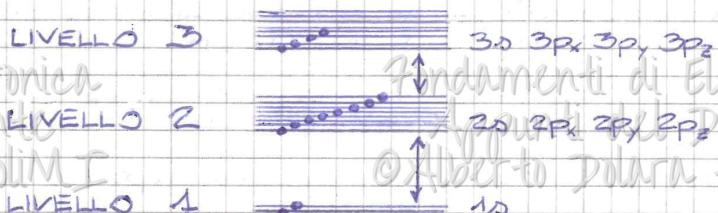
- Rilevanti per tutte le applicazioni: gruppi adiacenti al IV, quindi gruppo III e gruppo V; quindi 4-1 e 4+1.

- Esistono alcune applicazioni che fanno uso di materiali del II e del VI gruppo, quindi 4-2 e 4+2 (tipicamente per optoelettronica).

MATERIALE "PRINCIPE": SILICIO

tecnologicamente adattato da diverso tempo e molto avanzato

NUMERO ATOMICO $Z = 14$



Distanza fra livelli misurata in eV

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ J/C}$: tensione è buona per unità di carica

Disposizione secondo PRINCIPIO DI ESCLUSIONE

DI PAULI: non possono esistere due elettroni nello stesso stato

Gli elettroni di interesse sono unicamente quelli che stanno sul livello non completo. E' come se ci fosse un "core efficace +4" che tiene coordinati gli ultimi 4 elettroni.

Possibile definizione di eV: energia cinetica posseduta da un e⁻ accelerato nel vuoto da un campo elettrico il cui potenziale associato è pari ad 1 V

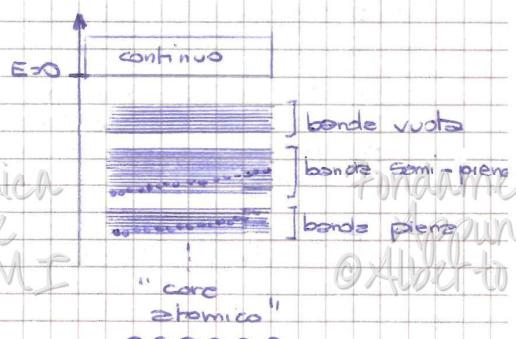
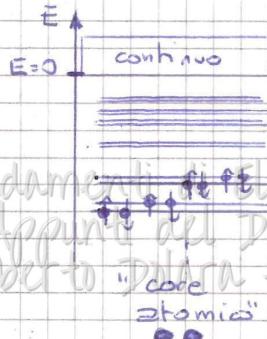
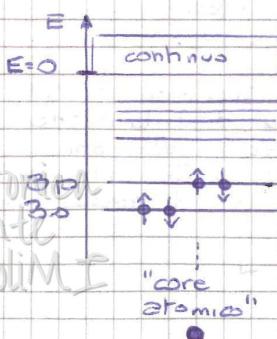
$$\frac{1}{2} m_e v^2 = q \cdot 1 \text{ V} \rightarrow v \approx 0,002 \text{ c} \approx 660000 \text{ m/s}$$

Step successivo: struttura elettronica di un CRISTALLO di silicio, in cui più atomi di silicio sono legati e condividono elettroni. Ipotizziamo, per semplicità, un cristallo lineare.

1 ATOMO

2 ATOMI

"oo ATOMI"



2 atomi in un cristallo interagiscono fra loro. Alla luce del principio di esclusione di Pauli, i livelli energetici si spostano con un piccolo spostamento in termini di energia di legame.

Portando il ragionamento al limite, ovvero per un numero elevatissimo di atomi nel cristallo, i livelli energetici "vicini" sono talmente tanti e talmente vicinamente da poter essere considerati una banda continua. Banda = intervallo energetico.

Nel cristallo vi sono \oplus bande e \ominus zone vuote.

Ultima banda piena \Leftrightarrow BANDA DI VALENZA ultima = ad energia più elevata

Prima banda vuota o semipiena \Leftrightarrow BANDA DI CONDUZIONE

prima = a più bassa energia

Banda di conduzione e bande di valenza sono coinvolte nei fenomeni di conduzione e controllo della corrente.

Struttura e banda del silicio

$\Delta E +$
1,1 eV

Bandas di conduzione
totalmente vuote

Bandas di valenza
totalmente piene

ESEMPIO: un elettrone che era sul bordo superiore della banda di valenza, per essere promosso sul livello più basso della banda di conduzione, deve ricevere un'energia di 1,1 eV. In questo modo l'elettrone si stacca dall'atomo (legame covalente) ed è libero di muoversi nel cristallo.

CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI:

CONDUTTORI: bande di valenza e banda di conduzione sono parzialmente sovrapposte o distanziate di un bandgap estremamente

comportamento piccolo che è inferiore all'energia termica.

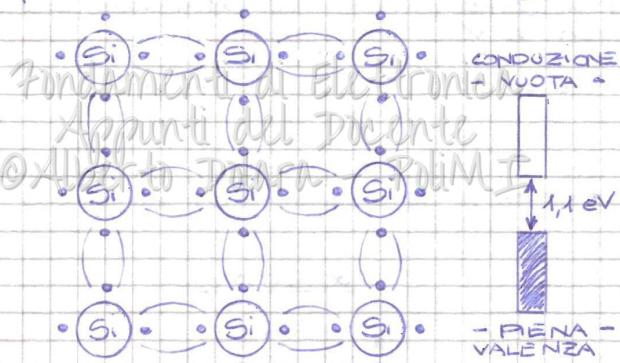
METALLICO Gli elettronni non spendono energia, o ne Spendono un'inezia, per poter entrare in bande di conduzione e muoversi nel cristallo.

ISOLANTI: bande di valenza e bande di conduzione sono separate da un bandgap elevato. Valore tipico 5 eV. (diamante ~ 7 eV)

SEMICONDUTTORI: bande di valenza e banda di conduzione sono separate da un bandgap moderato, di circa 1 eV

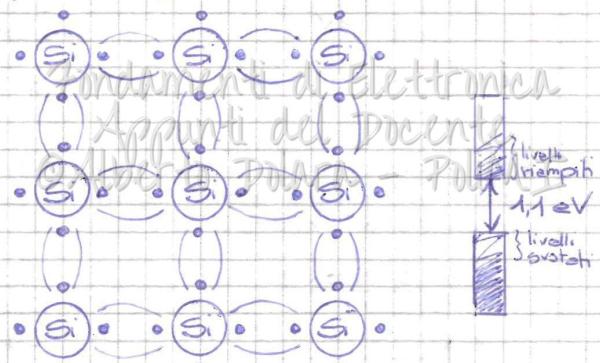
CRISTALLO DI SILICIO (RAFFRESENTAZIONE 2D)

NOTA BENE: nella realtà, il cristallo di silicio ha una struttura tridimensionale in cui gli atomi di Si si trovano ai vertici di un tetraedro regolare (ibridazione sp^3 degli orbitali). Per ragioni di rappresentazione lo si disegna con 4 legami piani disposti a 90°. I legami, nella realtà, sono lungo le diagonali del tetraedro



A 0 K il silicio è un isolante.

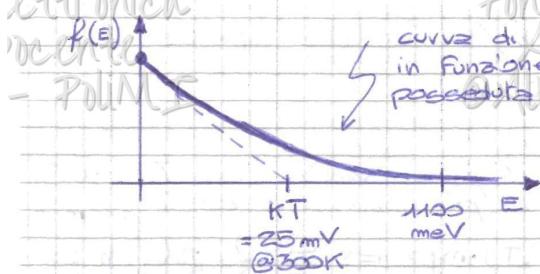
Non c'è agitazione termica (energia) per promuovere un elettrone in banda di conduzione.



A temperature superiore a 0K si ha una certa distribuzione energetica, alcuni elettroni hanno energia sufficiente per saltare in banda di conduzione.

DENSITÀ CRISTALLO DI SILICIO: $5 \cdot 10^{22}$ Atomi/cm³

Quanti elettroni hanno energie sufficienti per poter essere promossi in banda di conduzione? \Rightarrow Distribuzione di BOLTZMANN (statistica)



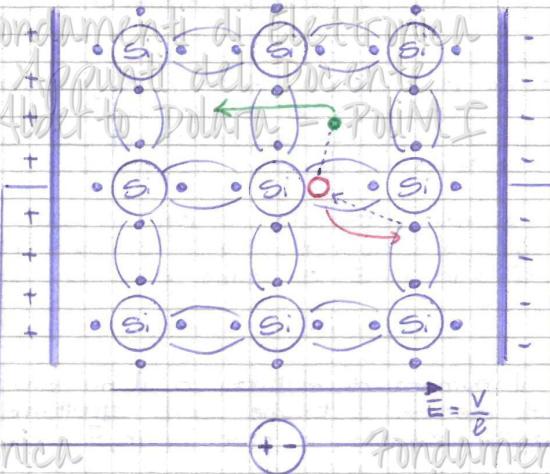
curva di densità di portatori in funzione dell'energia termica posseduta

$$\Rightarrow \langle E \rangle = 25 \text{ meV} @ 300 \text{ K}$$

$$E = kT$$

Alcuni elettroni, quelli che stanno sulla coda della distribuzione, sono quelli che possono essere promossi in banda di conduzione.

CORRENTE ELETTRICA IN UN SEMICONDUTTORE INTRINSECO



Applicando un campo elettrico determinato dalla differenza di potenziale applicata:

- ① L'ELETTRONE libero viene attratto verso l'elettrodo positivo
- ② Si genera una MANCANZA di un elettrone in un legame covalente, chiamata LACUNA
- ③ Gli elettroni "bloccati" nella banda di valenza (quelli che formano i legami) possono esitare nel posto lasciato libero senza spesa energetica - Il "riempimento" di un sito corrisponde alla generazione di un nuovo sito in un altro legame del cristallo.

- RISULTATO: la corrente circolante in un semiconduttore è dovuta a 2 modi di carica distinti:
- ① Moto degli elettroni PROMOSSI IN BANDA DI CONDUZIONE
 - ② Moto degli elettroni IN BANDA DI VALENZA, quindi VINCOLATI NELLEGAMI, che viene visualizzato in modo più comodo, come moto dei "buchi" lungo il cristallo.

\hookrightarrow Moto delle LACUNE, che sono delle pseudoparticelle. Si muovono in modo equivalente a cariche positive.

CORRENTE TOTALE: $I = I_m + I_p$

LEGGE DI AZIONE DI MASSA

quantifica le densità di elettroni e di lacune

n : densità di elettroni
 p : densità di lacune

SEMICONDUTTORE INTRINSECO

@300 K

$$\downarrow \quad n_i = p_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ portatori/cm}^3$$

- ① Intrinsico = cristallo formato da soli atomi di Si, di conseguenza l'unico meccanismo per la generazione di portatori è legato all'agitazione termica, che produce una coppia elettrone/lacuna.

N.B.: $5 \cdot 10^{22} \text{ atomi/cm}^3 \ggg 1,4 \cdot 10^{10} \text{ portatori/cm}^3 \Rightarrow$ Un legame rotto ogni $\approx 3,6 \cdot 10^{12} \text{ atomi}$
 $\approx 1,3 \cdot 10^{13} \text{ legami} (\times 4)$

SIGNIFICATO FISICO

la legge di azione di massa rappresenta l'equilibrio dinamico tra il numero di legami che si rompono (generazione coppia elettrone/lacuna) ed il numero di coppie elettrone/lacuna che si ricombinano naturalmente all'interno del materiale semiconduttore.

$G(T)$: tasso di generazione coppie elettrone/lacuna. Dipende solo da T in quanto legato all'agitazione termica.

$R(T)$: tasso di ricombinazione tra coppie elettrone/lacuna, che dipende da:

- Temperatura (agitazione termica).
- Disponibilità di elettroni liberi (densità n)
- Disponibilità di lacune (densità p)

$$R(T) = r(T) \cdot n \cdot p$$

$r(T)$: fattore di proporzionalità con T . $r'(T)$

EQUILIBRIO DINAMICO

$$G(T) = R(T) = r(T) \cdot n \cdot p \Rightarrow \frac{G(T)}{R(T)} = \frac{r(T) \cdot n \cdot p}{r(T) \cdot n \cdot p}$$

Ottobre

$$G(T) = r(T) \cdot n \cdot p$$

$$\hookrightarrow n \cdot p = \frac{1}{r(T)} \text{ dato che } \frac{G(T)}{R(T)} = 1, \text{ ma siccome } r(T) \text{ dipende solo dalla temperatura, } r(T) = K$$

$$\frac{G(T)}{r(T)} = \text{cost} = m_p$$

$$n \cdot p = m_p^2$$

m_p : concentraz. intrinseca

► m_p ($\text{e quindi } m_i^2$) è fortemente dipendente dalla temperatura, ad esempio passando da 300 K a 400 K si ha un incremento di m_p pari a circa 3 ordini di grandezza. Questo spiega il motivo per cui la resistività di un semiconduttore intrinseco diminuisce con la temperatura.

► La legge di azione di massa vale anche quando i portatori di carica sono generati con altri meccanismi fisici, in quanto riguarda solo le concentrazioni di portatori presenti nel materiale. A PRESCINDERE da come essi si sono generati.

Anche in un materiale in cui viene alterato il numero di elettroni o il numero di lacune, le concentrazioni delle popolazioni di elettroni e lacune sono strettamente legate fra loro, ovvero il loro prodotto resta costante e pari a m_i^2 .

Se aumenta la concentrazione di un portatore, diminuisce la concentrazione dell'altro.

ESEMPIO: ipotizziamo di sostituire alcuni atomi di Si nel cristallo con atomi di Fosforo, che è del II gruppo ed ha un elettrone "libero" in banda di conduzione.

L'aumento di elettroni liberi aumenta la possibilità di incontro con le lacune, queste ultime generate termicamente, di conseguenza aumenta il tasso di ricombinazione elettrone/lacuna.

A fronte di un aumento della ricombinazione elettrone/lacuna, ne consegue una riduzione delle concentrazioni di entrambe le specie. All'equilibrio, una parte degli elettroni "donati" dal fosforo avrà ricombinato con le lacune, e quindi a livello di portatori ci sarà la seguente configurazione

► Elettroni in banda di conduzione: elettroni intrinseci (T) + $> m_i$

► Lacune in bande di conduzione: lacune intrinseche (T) - $< p_i$ lacune ricombinate

VALÉ SEMPRE LA RELAZIONE PER CUI LA CONCENTRAZIONE DI PORTATORI POSITIVI MOLTIPLICATA PER LA CONCENTRAZIONE DI PORTATORI NEGATIVI È COSTANTE E PARI A m_i^2

IMPURITÀ NEI SEMICONDUTTORI

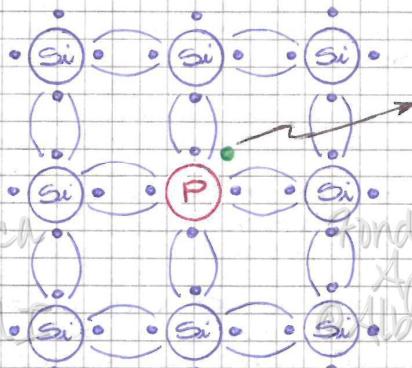
Per agire sulla conduttabilità dei semiconduttori è possibile "sostituire" ad alcuni atomi di silicio materiali di gruppi adiacenti che, di fatto, costituiscono delle IMPURITÀ (materiali di altre specie) nel reticolato cristallino.

- **POLIM** ▲ L'operazione di sostituzione degli atomi di silicio con altri elementi prende il nome di DROGAGGIO
- ▲ Un semiconduttore drogato è anche detto semiconduttore ESTRINSECO
- ▲ La resistività di un semiconduttore estrinseco può essere "regolata" entro un range di diversi ordini di grandezza.
- ▲ Le impurità possono essere di tipo DONORE (atomi del IV gruppo, es. fosforo) o di tipo ACCETTORE (atomi del III gruppo, es. Boro).

Fondamenti di Elettronica

DROGAGGIO DI TIPO IV

Consideriamo di sostituire ad un atomo di silicio un atomo di fosforo. La dimensione dei due atomi è simile (Si Z=14, P Z=15), il fosforo ha 5 elettroni sull'ultimo livello energetico



Energia di legame $\sim 10 \text{ meV} \ll 1,1 \text{ eV}$
 $\ll 25 \text{ meV}$

Di fatto, il quinto elettrone è trattenuto unicamente dal protone in più del fosforo, ed è un legame molto più debole del legame covalente. Basta pochissima energia per donare l'elettrone alla popolazione disponibile per la conduzione. L'energia termica a 300 K è già più che sufficiente.

NOTA BENE: il materiale è neutro nel momento in cui il quinto elettrone se ne va creando una lacuna che è "blindata" nell'atomo di fosforo, essendo dovuta al protone in più presente nell'atomo di fosforo.

Il drogaggio di tipo IV è un meccanismo che bilancia le specie dei portatori di carica, perché dà ad elettroni mobili senza dare lacune mobili. Avremo infatti come portatori mobili: in banda di conduzione.

ELETTRONI forniti dal drogante
ELETTRONI generati termicamente

LACUNE generate termicamente

$$N_e = N_D + n_f \approx N_D$$

$$n_f \approx \frac{2 \cdot 10^{20}}{N_D}$$

NOTA BENE: i valori di drogaggio tipici vengono da $10^{12} \text{ atomi (portatori)}/\text{cm}^3$ a $10^{19} \text{ atomi (portatori)}/\text{cm}^3$

↳ La concentrazione di portatori estrinseci è almeno 2 ordini di grandezza superiore rispetto alla concentrazione di portatori intrinseci (attivanti contributo non rilevante).

↳ La concentrazione di drogante è al massimo 3 ordini di grandezza inferiore alla concentrazione di atomi di silicio (nel cristallo puro).

"Il fosforo si trova attorniato da un mare di silicio".

T NOTA TECNOLOGICA: per "sostituire" gli atomi di Silicio con quelli di Fosforo si utilizzeranno dei processi di diffusione (con il fosforo in sorgente gassosa) agevolati dalla temperatura.

- Gli atomi di fosforo dovranno finire il più possibile in posizione SOSTITUTIVA

- Gli atomi di fosforo che finiscono in posizione INTERSTIZIALE generano difetti

Siccome il fosforo mette a disposizione un elettrone, si dice che il fosforo è un impurità di tipo DONORE.

ESEMPIO NUMERICO

Wafer di Silicio drogato con Fosforo con concentrazione 5×10^{15} atomi/cm³

ELETTRONI $n = N_D = 5 \cdot 10^{15}$ elettroni/cm³

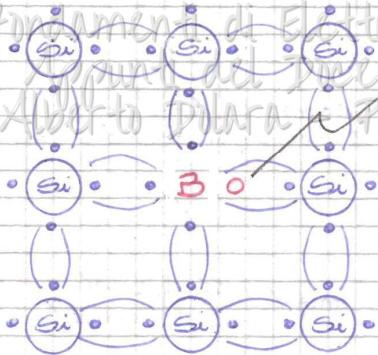
LACUNE $P = \frac{2 \cdot 10^{23}}{N_D} = 4 \cdot 10^4$ lacune/cm³

la densità di lacune è 12 densità delle elettroni.

Ci sono 11 ordini di grandezza tra i numeri di elettroni e di lacune.

DROGAGGIO DI TIPO P

Si sostituisce l'atomo di silicio con un atomo del terzo gruppo (ad esempio il Boro)



Posizione riempibile da un elettrone di valenza (valenza in questo caso significa impiegato nel doppi legame) con spesa energetica minima, ~ 10mJ/K a temperatura ambiente.

Elettroni di legame appartenenti ai legami covalenti del cristallo possono spostarsi nel sito accettore, generando una nuova posizione vuota → lacuna mobile senza liberare elettroni.

Gli atomi di Boro sono circondati da 4 "bracci", che sono legami covalenti, ma riescono a completarne solo 3.

Nel momento in cui la lacuna lascia l'atomo di Boro per muoversi lungo il cristallo, l'eccesso di un elettrone genera una carica negativa fissa in corrispondenza dell'atomo di Boro.

Il drogaggio di tipo P è un meccanismo che bilancia le specie dei portatori di carica, perché da solo lacune mobili senza dare elettroni mobili, ovvero senza dare elettroni in bande di conduzione. In bande di conduzione avremo:

LACUNE fornite dal drogante
LACUNE generate termicamente

ELETTRONI generati termicamente

$$N_A = P + P_T \approx N_A$$

$$P_T \approx \frac{2 \cdot 10^{23}}{N_A}$$

Il BORO dona al cristallo una lacuna. Siccome donare una lacuna significa estrarre un elettrone, e in genere il soggetto sono gli elettroni, si dice che il Boro è un ACCETTORE.

APPROFONDIMENTO: CASO GENERICO CON DROGAGGIO SIA n CHE p
Deve valere contemporaneamente:

• NEUTRALITÀ DELLA CARICA

$$P + N_D^+ = n + N_A^-$$

↳ Lacune in bande di conduzione, o lacune "mobili" e figlie degli accettori e della generazione termica

↳ Lacune "fisse" corrispondenti ai DONATORI dopo aver rilasciato il quinto elettrone

↳ elettroni "fissi" corrispondenti agli atomi ACCETTORI dopo aver catturato un elettrone ovvero dopo aver lasciato la lacuna

ettronica

• LEGGE DI AZIONE DI MASSA $P \cdot n = m^2$

Due equazioni in due incognite, P ed n , la cui soluzione si ottiene dalla soluzione del sistema.

Dragaggio n come cassa pericolare

AGGIUNTA DI DONORI CON CONCENTRAZIONE N_D^+

Neutralità $P + N_D^+ = m$

Azione di massa $P_m = m_u$

$$m = \frac{N_D^+}{2} \sqrt{N_D^{+2} + 4m_u^2} \approx N_D^+$$

escludo perché $m > 0$

$$P \approx \frac{m_u^2}{N_D^+}$$

Se $N_D^+_{\min} = 10^{12}$
allora $N_D^{+2} = 10^{24}$
mentre $m_u^2 = 10^{20}$

Dragaggio p come cassa pericolare

AGGIUNTA DI ACCETTORI CON CONCENTRAZIONE N_A^-

Neutralità $m + N_A^- = P$

Azione di massa $P_m = m_u$

$$P = \frac{N_A^-}{2} \sqrt{N_A^{-2} + 4m_u^2} \approx N_A^-$$

Stesse ipotesi

$$m \approx \frac{m_u^2}{N_A^-}$$

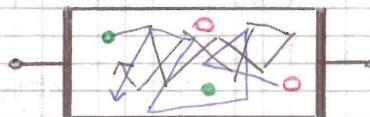
Fondamenti di Elettronica

MOTO DEI PORTATORI SOTTO L'EFFETTO DI UN CAMPO

Alberto Polara - Polimi

In assenza di campi elettrici esterni, elettroni e lacune mobili si muovono per effetto di agitazione termica in direzioni casuali, tant'è che la corrente netta è zero in quanto non vi è una direzione preferenziale di moto.

La casualità del moto è dovuta agli urti contro il reticolo cristallino o altre cariche dello stesso segno.



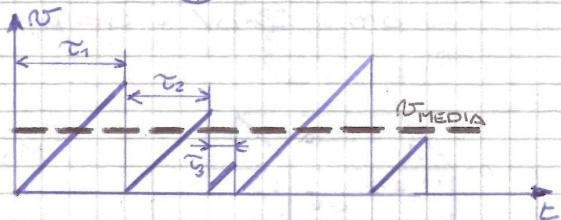
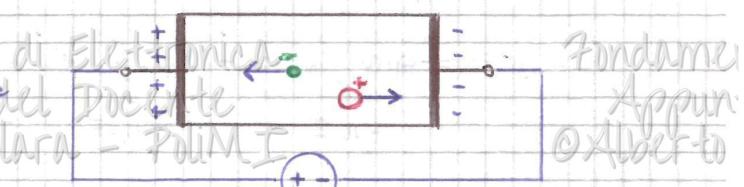
Una carica sottoposta ad un campo elettrico subisce un'accelerazione.

Fintanto che la carica non interagisce con altro (altra carica, reticolo cristallino, ecc...)

$$\vec{F} = q_e \vec{E} = m_e \vec{a} \quad \vec{a} = \frac{q_e}{m} \vec{E}$$

Moto uniformemente accelerato. Finché non urta il reticolo (tipicamente i legami covalenti). L'urto azzera la velocità, e dal momento dell'urto inizia un nuovo ciclo di accelerazione, fino all'urto successivo.

$$v_{\max} = \frac{q_e}{m_e} E \cdot \tau \quad v_{\text{media}} = \mu E$$

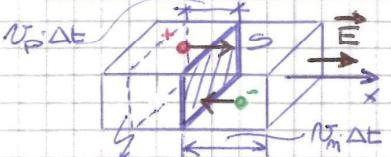


Fondamenti di Elettronica

Risulta un moto "medio" di tipo uniforme. Come un grano che cade in un fluido, o un paracadutista in caduta libera.

Alberto Polara - Polimi

CALCOLO DELLA CONDUCIBILITÀ DI UN SEMICONDUTTORE



Corrente elettrica: $I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$

E' la carica che attraversa la superficie S nell'unità di tempo.

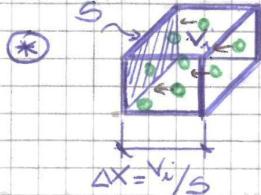
Nello schema di cui sopra, tutte le cariche n_p che stanno in un volume di base S e altezza $n_p \cdot \Delta t$, così come tutte le cariche p (lacune) che stanno in un volume di base S ed altezza $n_m \cdot \Delta t$, attraversano la sezione S in un intervallo Δt .

NOTA: per semplicità si considera la conduttorità // all'asse del semiconduttore e uniforme su tutta la sezione, ovvero il campo elettrico applicato è uniforme e // all'asse x .

Sotto le ipotesi precedenti: $I = J \cdot S$ (pedice x perchè il moto è unidirezionale lungo l'asse x)

$$\text{Docente } J_x = \frac{I}{S} = \sum_{i=1}^n p_i V_i \frac{1}{S \cdot \Delta t} = \sum_{i=1}^n p_i n_i V_i = q_e P \cdot n_p - q_e m n_m = \frac{n_p}{\text{cm}^3} \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \frac{q_e}{\text{nm}} \frac{\mu_p E}{\text{V}} - \frac{n_m}{\text{cm}^3} \frac{\mu_m E}{\text{V}}$$

$$= (q_e \mu_p + q_e m \mu_m) E_x$$



① $\Delta x = \frac{V_i}{S}$ = altezza del volume che contiene le cariche che attraversano la sezione S

② $\frac{\Delta x}{\Delta t} = n_i \frac{V_i}{\Delta t}$ legge di Ohm locale

RELAZIONE COSTITUTIVA

$$J_x = \sigma E \Rightarrow \sigma = (\sigma_m + \sigma_p) = q_m \mu_m + q_p \mu_p$$

Nel silicio la mobilità degli elettroni è maggiore della mobilità delle lacune.

$$\mu_m \approx 1300 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_p} \approx 3$$

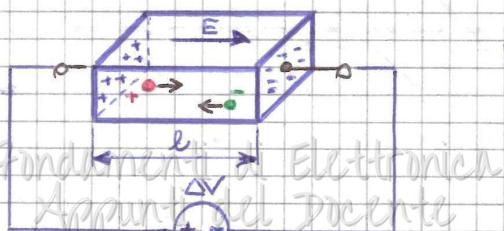
$$\mu_p \approx 400 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

Questa diversa mobilità fa preferire gli elettroni rispetto alle lacune in diverse applicazioni.

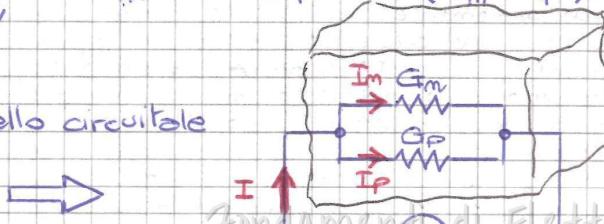
Corrente di conduzione: $I = I_m + I_p$

$$I = J \cdot S = -q_m n_m \cdot S + q_p n_p \cdot S = q_m \mu_m \cdot S E + q_p \mu_p \cdot S E = \sigma_m \cdot S \cdot E + \sigma_p \cdot S \cdot E = \sigma \cdot S \cdot E$$

$$= q_m \mu_m \frac{S}{l} \Delta V + q_p \mu_p \frac{S}{l} \Delta V = G_m \cdot \Delta V + G_p \cdot \Delta V = (G_m + G_p) \Delta V$$



Modello circuitale



NOTA: la corrente viene portata principalmente dai portatori maggioranza (specie più popolosa).

ettronica
docente
- Polimi

Fundamenti di Elettronica
Appunti del Docente
Alberto Dolara - Polimi

Fundame
Appun
Alberto