

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

AA. 2003/2004

SINTESI DEGLI ARGOMENTI TRATTATI DURANTE LE LEZIONI DI ELETTRONICA

Testi di riferimento

R.C.Jaeger, Microelettronica, Mc Graw-Hill

Millman-Grabel, Microelettronica, Mc Graw-Hill

GENERALITA'

- Le realizzazioni dei calcolatori sono legate alla disponibilità di dispositivi elettronici
- La prima generazione di calcolatori è legata al dispositivo “**valvola termoionica**”
Era possibile realizzare dei calcolatori molto ingombranti e di notevole consumo di potenza. Questi due aspetti creavano notevoli problemi ai sistemi di contorno.
- La seconda generazione si ha con l'impiego dei “**transistori**”
con questi le dimensioni si riducono drasticamente e anche il consumo di potenza scende notevolmente.
- La terza generazione si ha con i “**circuiti integrati**”
con questi, sempre realizzati con dei transistori, si raggiunge una miniaturizzazione che consente l'introduzione di decine di transistori in solo contenitore. Con questa tecnologia si possono finalmente realizzare dei calcolatori molto piccoli, veloci e in definitiva meno costosi e di notevoli prestazioni.
- La quarta generazione è quella della “**VLSI**” (very large scale integration).
Questa è praticamente l'attuale generazione di calcolatori.
Questa tecnologia ha consentito la realizzazione di circuiti integrati con decine di migliaia di circuiti elementari realizzati con transistori su un singolo chip. Questo ha dato il via alla realizzazione di calcolatori sempre più piccoli e più veloci. Accanto a questa evoluzione, legata esclusivamente al dispositivo base impiegato c'è stata anche una evoluzione sulle modalità di realizzazione, sempre legate all'hardware.

Analizziamo adesso quali, in linea di massima, sono le essenziali esigenze che ha il calcolatore per funzionare e quindi analizzare, per alcune realizzazioni particolari, l'impiego dei dispositivi elettronici.

Prendiamo in considerazione la scatola di un generico calcolatore da tavolo.

Notiamo, come elemento essenziale, l'unità centrale costituita da molti elementi parziali al suo interno. L'elemento base dell'unità centrale è la scheda madre; questa è collegata con tutte le parti, interne ed esterne all'unità centrale. Il trasferimento dei segnali fra la scheda madre e le altre parti avviene, quasi sempre, attraverso delle interfacce. Quest'ultime sono realizzate in modo specifico in relazione alle due parti collegate. Avremo quindi delle interfacce realizzate per collegare dei sensori al calcolatore, o degli attuatori, o anche le parti essenziali al funzionamento dello stesso calcolatore (tastiera, monitor, stampanti, etc.). All'interno ci sarà necessariamente un alimentatore realizzato al fine di soddisfare tutte le esigenze dei vari dispositivi, interni e in alcuni casi anche esterni (per alimentare delle periferiche che richiedono una piccola potenza). Vi sono inoltre dei dispositivi di segnalazione ottici (lampade spia), o acustici (buzzer, altoparlanti). Ciascuno di questi blocchi è realizzato utilizzando dispositivi elettronici che possono essere dei transistori o dei circuiti integrati (quest'ultimi di tipo analogico o digitale).

Prima di procedere consideriamo la situazione relativa all'inserimento del calcolatore nel sistema circostante.

Il mondo in cui viviamo è di generalmente del tipo detto **“analogico”**

Tutte le grandezze di nostro interesse (tensioni, correnti, temperature, intensità luminose, pressioni, etc.) sono di tipo analogico, sono caratterizzate da infiniti valori possibili all'interno di due valori limite. Ad esempio i valori compresi fra 10°C e 12°C possono essere

10,00-10,01-10,0101-10,01011.....12°C, possiamo dire che fra il valore di 10 °C e 12 °C ci sono infiniti valori intermedi; nella realtà sappiamo che un termometro di buona qualità (in grado di misurare il decimo di grado) darà una indicazione del tipo 10-10,1-10,2.....12; cioè soltanto 21 valori e non infiniti.

Vi sono poi i segnali “digitali” che sono poi quelli preferiti dai calcolatori. Questi segnali hanno solo due valori possibili, e sono quindi detti “binari”. In particolare i due valori possibili sono “0” ed “1”, questo valore sarà il “bit”.

Tutti i dispositivi analogici accettano segnali analogici (cioè teoricamente infiniti valori possibili, ma che in pratica non lo sono)

Tutti i dispositivi digitali (calcolatori) accettano segnali binari, cioè fra due possibili valori. A volte si pone il problema di poter trasferire al calcolatore, che sa leggere solo due valori, un valore più grande, ad esempio “8”.

E' ovvio che questo numero va espresso con più “BIT”, ma quanti ?

Questo processo di limitazione nella trasformazione viene chiamato “DIGITALIZZAZIONE”. Occorre inoltre chiarire anche il concetto di “QUANTIZZAZIONE”.

Il segnale con infiniti valori possibili viene volutamente limitato ad un numero finito di valori possibili; questa limitazione costituisce l'errore di quantizzazione.

Tutte le volte che i segnali viaggiano all'interno della macchina o fra macchine o circuiti digitali la trasmissione sarà di tipo “binario” cioè con valori del tipo “0” o “1”.

Per poter trasferire alla macchina segnali provenienti o da questa diretti verso il mondo esterno occorre allora effettuare una trasformazione.

ANALOGICO—DIGITALE
o
DIGITALE—ANALOGICO

Tutti i vari blocchi sono realizzati con dispositivi elettronici.

Questi dispositivi vanno alimentati per poter funzionare.

Cominciamo quindi ad analizzare le possibili fonti di energia per l'alimentazione.

a) **BATTERIA**

b) **RETE ELETTRICA**

I dispositivi elettronici con una alimentazione di tensione continua e di valore 5 Volt

Una tensione di 12 Volt viene adoperata soltanto per alcuni dispositivi (in genere meccanici)

Per le apparecchiature portatili il problema dell'alimentazione viene risolto utilizzando delle batterie.

Per tutte le altre apparecchiature, che è la maggioranza, l'alimentazione viene ottenuta dalla rete elettrica.

La rete elettrica ha delle caratteristiche ben precise:

è caratterizzata da una **tensione di 220 Volt alternata di tipo sinusoidale con frequenza di 50 Hz**

Come è facile dedurre la rete ha caratteristiche molto diverse dai valori richiesti dai vari dispositivi, sia di tipo analogico che digitale.

Occorrerà soddisfare due esigenze:

Trasformazione da alternata in continua

Riduzione dal valore di 220 Volt a 5 o 12 Volt.

La scatola che deve effettuare questa duplice trasformazione prende il nome di **alimentatore**

Di questo alimentatore fanno parte il **trasformatore** che ha il preciso compito di ridurre il valore della tensione e vari **diodi** e **condensatori** per la trasformazione in continua e in taluni casi alcuni transistor per renderla di valore costante al variare delle apparecchiature alimentate.

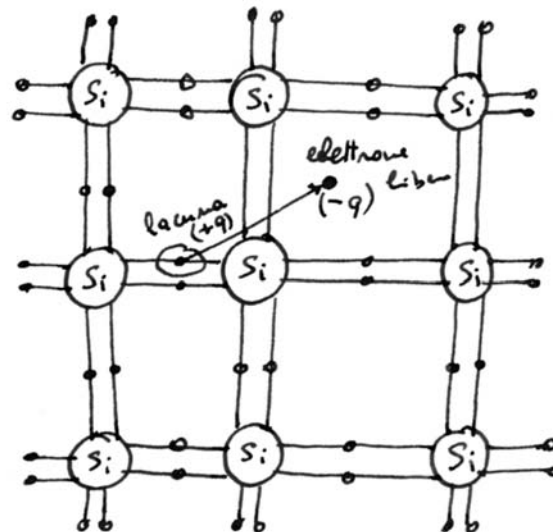
CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI A STATO SOLIDO IN BASE AL VALORE DELLA RESISTIVITA'

ISOLANTI	$\rho > 10^5 \ \Omega \cdot cm$
SEMICONDUTTORI	$10^{-3} < \rho < 10^5 \ \Omega \cdot cm$
CONDUTTORI	$\rho < 10^{-3} \ \Omega \cdot cm$

I semiconduttori elementari Silicio (Si) e Germanio (Ge) appartengono entrambi alla quarta colonna della tavola periodica degli elementi e hanno quindi quattro elettroni di valenza sull'orbita più esterna (che ne può contenere al massimo otto)

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Nella forma cristallina, ogni atomo di silicio impegna i suoi quattro elettroni dell'orbita più esterna per formare legami covalenti con i quattro atomi più vicini (modello a legame covalente)



Per temperature sufficientemente elevate, l'energia termica può provocare la rottura di un legame covalente e la conseguente formazione di una coppia elettrone (carica -q) – lacuna (carica +q) ($q=1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

Il valore comune della densità n di elettroni liberi e della densità p di lacune è detto concentrazione intrinseca e si indica con n_i .

Tale valore dipende dal materiale e dalla temperatura assoluta T attraverso la relazione

$$n_i^2 = B T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Dove E_g rappresenta il valore minimo dell'energia necessaria a rompere un legame covalente e a liberare un elettrone, $k=8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ è la costante di Boltzmann e B è un parametro caratteristico del materiale.

Per il Si a temperatura ambiente ($T=300 \text{ K}$) $n_i = 6,7 \cdot 10^9 / \text{cm}^3$

Le cariche mobili (elettroni e lacune) generate per effetto termico in un semiconduttore (detto "intrinseco") acquistano, se sottoposte a un campo elettrico \mathbf{E} , una velocità (detta "di deriva") proporzionale, per campi non troppo intensi, al campo stesso

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad \text{per gli elettroni}$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \quad \text{per le lacune}$$

dove le costanti di proporzionalità μ sono dette "mobilità".

Le velocità di deriva danno luogo a correnti di deriva (nella direzione e nel verso di \mathbf{E}) di densità proporzionali al campo elettrico

$$\vec{J}_n \text{ (deriva)} = (-q) n \vec{v}_n = q n \mu_n \vec{E}$$

$$\vec{J}_p \text{ (deriva)} = q p \vec{v}_p = q p \mu_p \vec{E}$$

Il rapporto σ tra densità totale di corrente di deriva e campo elettrico è detto "conducibilità"

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

e il suo inverso è detto "resistività"

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q (n \mu_n + p \mu_p)}$$

Il silicio intrinseco a temperatura ambiente ha una

$$\rho = 3,38 \cdot 10^5 \Omega$$

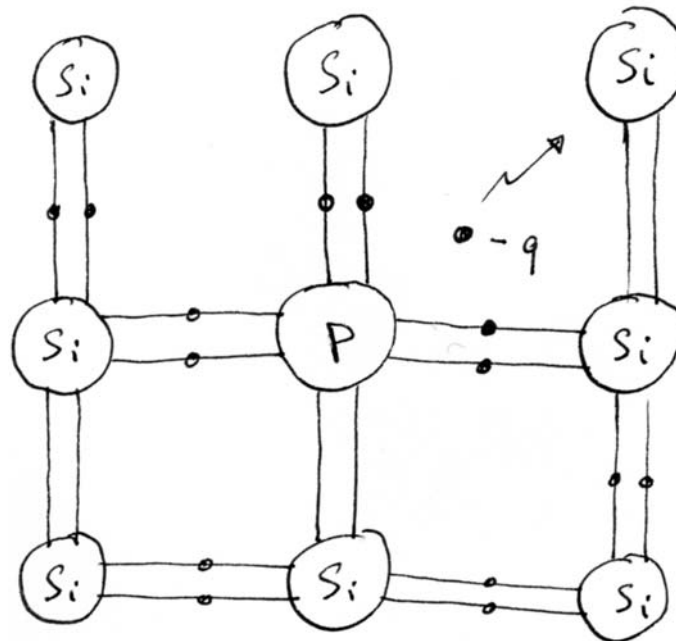
che si colloca all'estremo inferiore dell'intervallo di valori caratteristici di un isolante.

La conducibilità di un semiconduttore può essere aumentata attraverso un processo detto "drogaggio".

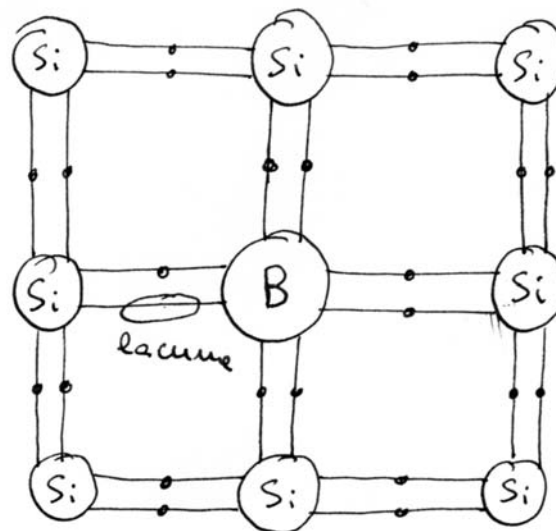
Sostituendo atomi di un elemento della V colonna della tavola periodica (ad esempio fosforo) al posto di alcuni atomi di silicio nel reticolo cristallino, il quinto elettrone dell'orbita più esterna del fosforo non entra nei legami covalenti e, già a temperatura ambiente, abbandona l'atomo a cui appartiene e diventa un elettrone di conduzione.

Il semiconduttore diventa così ricco di elettroni di conduzione ed è detto “drogato o estrinseco di tipo n”.

Gli atomi droganti sono detti “impurità di tipo donatore”



Sostituendo atomi di un elemento della III colonna della tavola periodica (ad esempio boro) al posto di alcuni atomi di silicio nel reticolo cristallino, il legame covalente non saturato tra un atomo di boro e un atomo di silicio costituisce una lacuna



Il semiconduttore diventa così ricco di lacune disponibili per la conduzione ed è detto “drogato o estrinseco di tipo p”.

Gli atomi droganti sono detti “impurità di tipo accettore”.

In un semiconduttore estrinseco di tipo n, la concentrazione n degli elettroni liberi è sostanzialmente uguale alla concentrazione N_D degli atomi donatori ed è molto maggiore della concentrazione intrinseca n_i .

$$n \cong N_D \gg n_i$$

Gli elettroni provenienti dalle impurità droganti sono detti “portatori maggioritari” e le lacune generate termicamente sono dette “portatori minoritari”

In un semiconduttore estrinseco di tipo p, la concentrazione p delle lacune è sostanzialmente uguale alla concentrazione N_A degli atomi accettori ed è molto maggiore della concentrazione intrinseca n_i .

$$p \cong N_A \gg n_i$$

Le lacune provenienti dalle impurità droganti sono dette “portatori maggioritari” e gli elettroni generati termicamente sono detti “portatori minoritari”.

All'equilibrio termodinamico vale la relazione

$$p n = n_i^2$$

Inoltre, la neutralità elettrica del semiconduttore impone (in presenza di entrambi i tipi di impurità) che

$$(q N_D - q n) + (q p - q N_A) = 0$$

Dalle due precedenti relazioni si ricavano le concentrazioni dei portatori maggioritari e minoritari

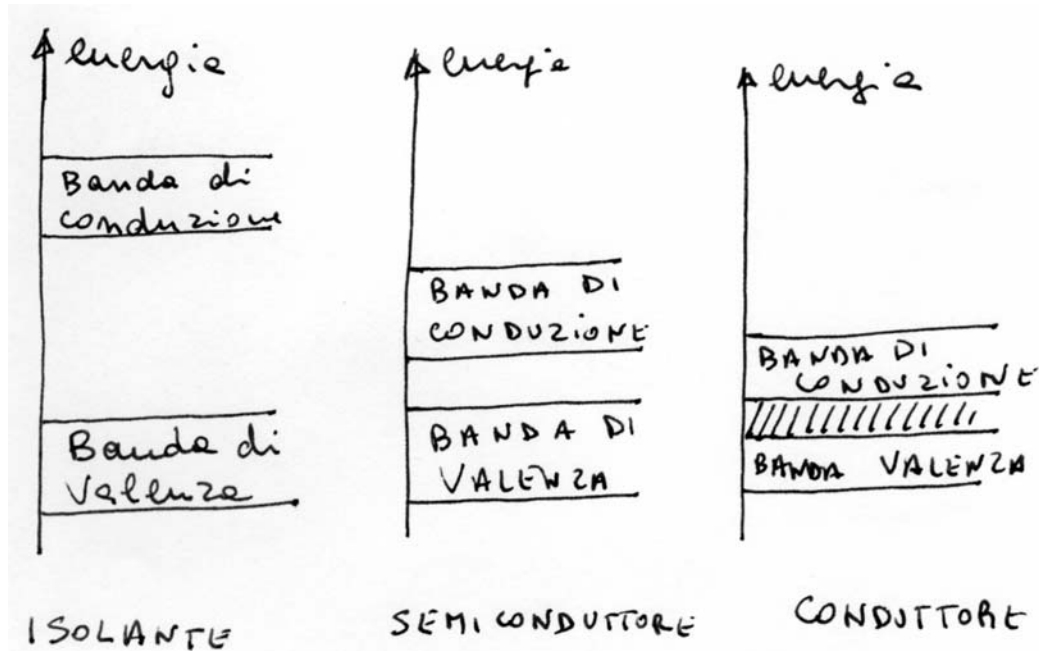
Se $N_D > N_A$ (semiconduttore di tipo n)

$$n = \frac{N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4 n_i^2}}{2} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

Se $N_A > N_D$ (semiconduttore di tipo p)

$$p = \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4 n_i^2}}{2} \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

La meccanica quantistica mostra che i livelli energetici consentiti per gli elettroni formano delle bande permesse separate da bande proibite (modello a bande di energia).
 La posizione relativa tra la più alta banda riempita di elettroni (banda di valenza) e la più bassa banda vuota (banda di conduzione) determina il comportamento del materiale come isolante, semiconduttore o conduttore.

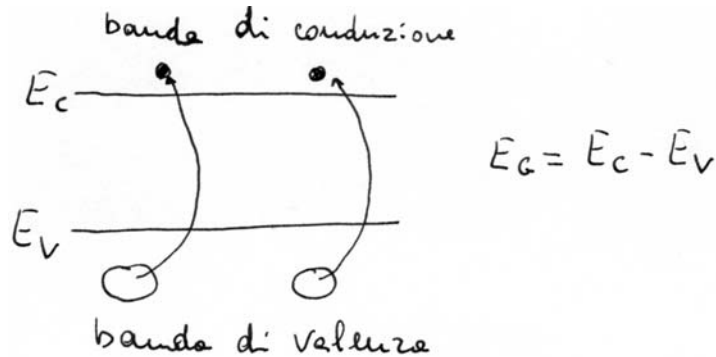


E_C = limite inferiore della banda di conduzione

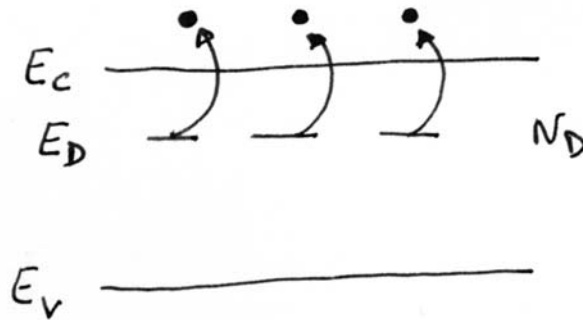
E_V = limite superiore della banda di valenza

$$E_G = E_C - E_V \equiv \text{ampiezza della banda proibite}$$

La generazione di coppie elettrone-lacuna in un semiconduttore intrinseco ha luogo quando l'energia termica fornita al cristallo supera il valore E_G .

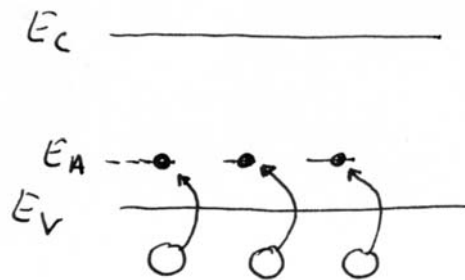


In un semiconduttore estrinseco di tipo n le impurità di tipo donatore introducono un ulteriore livello E_D , localizzato all'interno della banda proibita in prossimità del livello E_C .



A temperatura ambiente, l'energia termica supera $E_C - E_D$ e praticamente tutti gli elettroni non impegnati nei legami covalenti passano dagli atomi donatori alla banda di conduzione.

In un semiconduttore estrinseco di tipo p, le impurità di tipo accettore introducono un ulteriore livello E_A , localizzato all'interno della banda proibita in prossimità del livello E_V .



A temperatura ambiente, l'energia termica supera $E_A - E_V$ e praticamente tutti i legami non soddisfatti degli atomi accettori vengono riempiti con elettroni provenienti dalla banda di valenza.

Nei semiconduttori estrinseci, all'aumentare del drogaggio e quindi della concentrazione dei portatori maggioritari, aumenta la conducibilità (nonostante la contemporanea diminuzione della mobilità)

$$\sigma \cong q \mu_n N_D \text{ per SEMICONDUTTORI di tipo n}$$

$$\sigma \cong q \mu_p N_A \text{ per SEMICONDUTTORI di tipo p}$$

Corrispondentemente, al crescere del drogaggio la resistività diminuisce di diversi ordini di grandezza.