

# Appunti Elettronica Digitale

Leonardo Toccafondi

2024-04-12



# Indice

<b>1</b>	<b>Dispositivi elettronici</b>	<b>1</b>
1.1	Semiconduttori . . . . .	1
1.1.1	Giunzione p-n . . . . .	1
1.1.2	Diodo . . . . .	3
<b>A</b>	<b>Esercizi</b>	<b>5</b>
A.1	Esercizi capitolo 1 . . . . .	5
<b>B</b>	<b>Varie</b>	<b>7</b>
B.1	Semiconduttori e bande . . . . .	7



# Capitolo 1

## Dispositivi elettronici

### 1.1 Semiconduttori

I semiconduttori sono i materiali con cui sono composti i circuiti integrati. Sono, come suggerisce il nome, materiali in cui il flusso di corrente *non è libero* (non è un conduttore), ma è **presente** (non è un isolante).

In particolare, conducono in particolari situazioni. Quali sono però i materiali con queste condizioni?

- *Elementi semiconduttori*: Silicio (Si), Germanio (Ge) (Carbonio (C), ma composto)
- *Elementi composti*: GaAs, GaN (Gallio-Arsenico/Azoto) In generale sono gli elementi della 4° colonna della tavola periodica o composti a numero medio di elettroni liberi pari a 4 (dai 3 ai 4).

#### Silicio

Il silicio è il materiale semiconduttore sicuramente più diffuso.

Un atomo presenta 4 elettroni (detti di *valenza*) nello strato più esterno, ma la sua forma cristallina pura del silicio ogni atomo forma un legame covalente <sup>a</sup> con i suoi vicini "più prossimi". Il cristallo di silicio puro ha inoltre una struttura cristallina matriciale, che blocca il passaggio di carica.

È da notare che all'aumentare della temperatura, qualche elettrone può rompere il legame e muoversi liberamente nel cristallo.

<sup>a</sup>legame chimico in cui due atomi mettono in comune delle coppie di elettroni.

Per dotare un materiale semiconduttore di conduttività *selettiva* è necessario "*drogare*" il materiale stesso. Il drogaggio, quindi, va a **modificare** la concentrazione di elettroni e di *lacune* <sup>1</sup>, attraverso questo inserimento di impurità sostituzionali (ovvero atomi di elementi diversi, i quali si sostituiscono ad alcuni degli atomi di silicio.) In pratica andiamo ad aggiungere, in piccole dosi, nel reticolo cristallino materiali della 5° colonna (drogaggio di tipo **n**, hanno 5 elettroni di valenza, sono detti **donatori**, ad esempio il fosforo), o elementi della 3° colonna (tipo **p**, hanno 3 elettroni di valenza e sono detti **accettori**, ad esempio il boro).

Tale discrepanza induce la formazione di livelli energetici aggiuntivi all'interno della banda proibita<sup>2</sup> o "gap" del semiconduttore. Nel primo caso si genera un eccesso di lacune, le quali si comportano come particelle cariche *positivamente*, mentre nel secondo si ha un eccesso di elettroni liberi, determinando così una variazione della conducibilità elettrica intrinseca del materiale.

Non solo, sia le lacune che gli elettroni liberi sono quindi liberi di muoversi all'interno del semiconduttore!

La qualità del semiconduttore è influenzata dal materiale usato (per esempio Ge è meglio del Si, ma è più raro), che è a sua volta influenzato dal goal<sup>3</sup> (elettronica digitale usa Si, l'elettronica di potenza il GaN o SiC).

Vediamo ora degli elementi in silicio.

#### 1.1.1 Giunzione p-n

Una giunzione pn (o p-n) si forma quando una del materiale semiconduttore intrinseco <sup>4</sup> drogato con un drogaggio p (con una percentuale  $N_A$ , n. accettori) viene posta a contatto con altro materiale semiconduttore

<sup>1</sup>Assenza di elettroni dovuta alla **rottura** di un legame. È insieme all'elettrone, un portatore di carica nei semiconduttori.

<sup>2</sup>Intervallo di energia interdetto agli elettroni, distanza tra la banda di valenza di conduzione (nei semiconduttori distanti 1eV).

<sup>3</sup>(penso voglia dire "obiettivo perseguito").

<sup>4</sup>Puro, quindi privo di un quantitativo significativo di drogaggio.

drogato con un drogaggio n (con una percentuale  $N_D$ , n. donatori).

La concentrazione di ioni dalle seguenti “formule”:

$$N_A = \frac{\#acceptors}{vol.unit} \text{ e } N_D = \frac{\#donors}{vol.unit}$$

dove  $N_a$  indica il numero<sup>5</sup> di ioni di tipo p: ‘positivo’, mentre  $N_d$  il numero di ioni di tipo n: ‘negativo’.

Collegando un blocco drogato tipo p ed uno tipo n abbiamo (idealmente)<sup>6</sup>

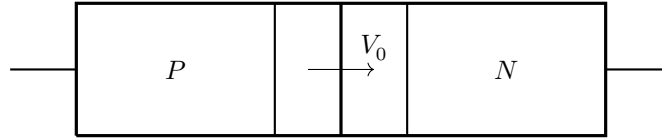


Figura 1.1: Giunzione pn

Il materiale quindi è separato in due zone *nettamente distinte*, senza alterazione della struttura cristallina all'interfaccia delle due zone.

L'abbondanza di lacune in p è, come sappiamo, corrispondente ad una carenza di elettroni, di cui n *abbonda*. In altre parole questa diversa *densità* di portatori di carica genera una **migrazione** di elettroni da N verso P, detta anche *diffusione*<sup>7</sup> (*elettrica*) oppure anche *corrente di diffusione*, che consiste quindi in

- lacune che si diffondono dalla regione (dal semiconduttore) drogata con p alla regione n;
- elettroni che si diffondono dalla regione drogata con n alla regione p.

N.B.:(i *portatori maggioritari* sono le cariche positive su n e negative su p)

Tale fenomeno carica in modo *positivo* il semiconduttore n (meno elettroni), e in modo *negativo* il semiconduttore p (più elettroni): non solo, questo spostamento crea a cavallo della giunzione un campo elettrico. Una volta che la corrente di diffusione equivale la corrente di trascinalimento<sup>8</sup> raggiungiamo un **equilibrio**: La presenza del campo elettrico comporta la presenza di una differenza di potenziale. Questa è anche detta **barriera di potenziale**, in quanto si oppone (come una barriera) ai portatori di carica soggetti alla spinta della diffusione (si oppone al movimento di elettroni nella regione p e lacune nella regione n). Infatti con lo spostamento di lacune ed elettroni essa aumenta fino a impedirne il superamento<sup>9</sup>.

Nel punto di contatto si crea così una zona in cui tutte le lacune sono state riempite, e tutti gli elettroni extra di p ceduti. Tale zona è detta **depletion layer** (regione di svuotamento o di carica spaziale), al cui interno **non** vi sono portatori mobili (di carica), i quali non possono “fermarsi” dove vi è una differenza di potenziale (gli atomi donatori respingono le lacune e gli atomi accettori respingono gli elettroni).

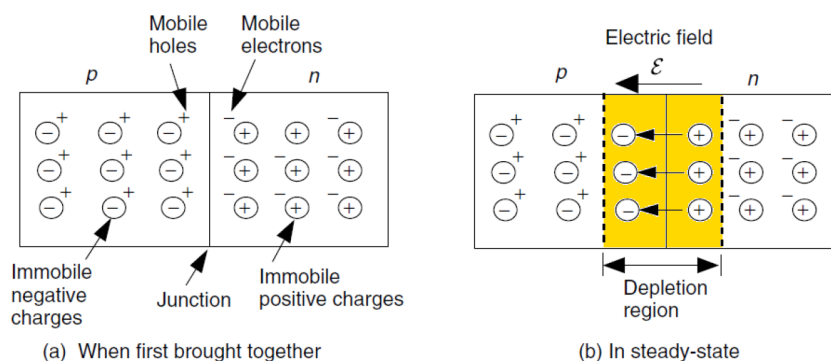


Figura 1.2: Regione di svuotamento e movimento di lacune ed elettroni

In genere la regione di svuotamento non è simmetrica: la seguente equazione regola la larghezza della regione:

$$x_p N_A = x_n N_D$$

<sup>5</sup>Oppure densità di ioni, o concentrazione...

<sup>6</sup>Nella pratica parto da un blocco puro di silicio, per poi iniettare a *strati* il drogaggio.

<sup>7</sup>Fenomeno che si ritrova in natura qualora vi sia uno squilibrio nella distribuzione nello spazio di particelle simili.

<sup>8</sup>Detta anche corrente di deriva, in questo caso i portatori si muovono perché **spinti** dal campo elettrico.

<sup>9</sup>È possibile superarla, ma deve essere fornita una differenza di potenziale **\*\*esterna\*\***

dove  $x_p$  e  $x_n$  sono rispettivamente le **larghezze** della regione di svuotamento entro il semiconduttore drogato p e drogato n.

Come si vede nella figura 1.3:

- $N_A > N_D \rightarrow$  più è drogata la regione più la regione di svuotamento è piccola.

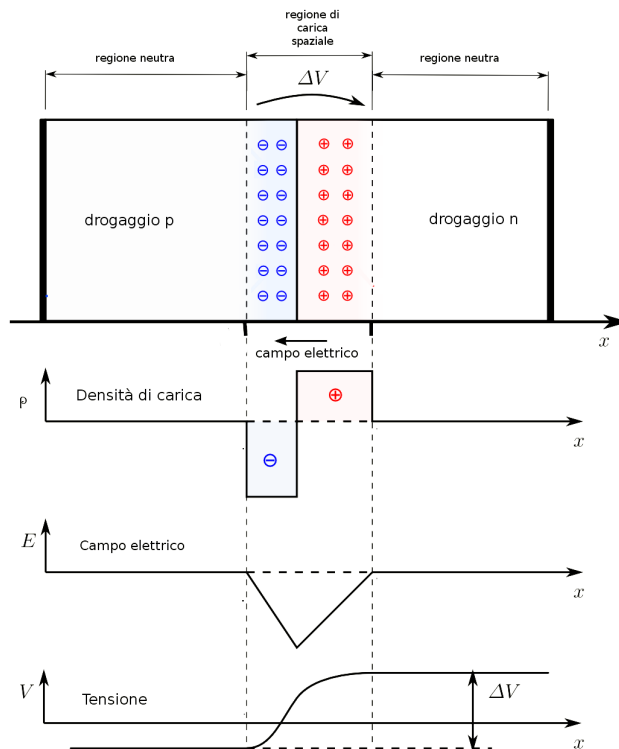


Figura 1.3: Grafici relativi al potenziale, al campo elettrico e alla carica nella giunzione pn

### 1.1.2 Diodo

Il simbolo circuitale della giunzione p-n, detta **diodo**<sup>10</sup> è

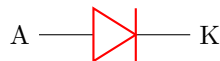


Figura 1.4: Diodo

dove a sinistra abbiamo un **anodo** A (dal greco *salita*), e a destra un **catodo** K (dal greco *discesa*).

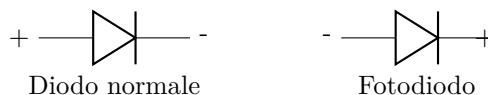
Sia la zona p che la zona n sono munite di un contatto elettrico (detto **reoforo**), in modo tale che sia possibile applicarvi una tensione. È da notare come la zona n in contatto col suo reoforo deve essere molto drogata (approfondire).

#### 1.1.2.1 Polarizzazione

In base all'applicazione di un potenziale sul diodo posso distinguere la:

- Polarizzazione **diretta** (forward bias): applico un potenziale positivo sull'anodo A e negativo sul catodo K, "alzando" il potenziale

#### 1.1.2.2 Diodi Speciali



<sup>10</sup>Un diodo è un dispositivo elettrico che permette alla corrente di muoversi attraverso di esso in una direzione con molta più facilità che nell'altra. È il dispositivo più semplice che fa uso di una giunzione p-n.





# Appendice A

## Esercizi

### A.1 Esercizi capitolo 1



# Appendice B

## Varie

### B.1 Semiconduttori e bande

Gli elettroni in un solido allo stato fondamentale e a temperatura 0 kelvin, in obbedienza alla loro natura fermionica e al principio di Pauli che preclude ai fermioni il fatto di potersi trovare in due nello stesso stato, riempiono gli stati elettronici loro consentiti partendo dal livello energetico più basso via via su, fino a che tutti gli elettroni del solido hanno trovato un'accomodazione. Si distribuiscono cioè rispettando la distribuzione di Fermi-Dirac calcolata a temperatura 0 kelvin. Nei metalli, il livello energetico più alto occupato si definisce livello di Fermi.

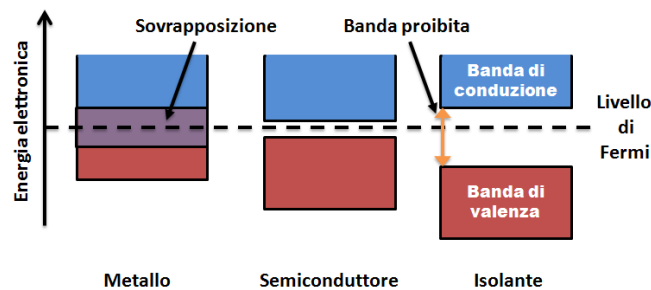


Figura B.1: Schema semplificato della struttura elettronica a bande per metalli, semiconduttori e isolanti.

A questo punto possono verificarsi diverse possibilità:

- Vi è una banda, o più di una fra le ultime riempite da elettroni, che è parzialmente riempita e restano degli stati vuoti. In tal caso si ha a che fare con un metallo, cioè un sistema in cui gli ultimi elettroni hanno la possibilità di spostarsi in livelli energetici molto vicini, infinitesimalmente più alti in energia, e dunque hanno la possibilità di una mobilità elevata che porta il sistema ad essere un buon conduttore di elettricità.
- L'ultima banda è stata riempita completamente in modo tale che il prossimo stato elettronico consentito si trovi sulla banda successiva e fra questa banda e la banda completamente riempita c'è una banda proibita (*band gap*) di energie. In tal caso il solido è un dielettrico.
- Si parla infine di semiconduttore nel caso di un isolante in cui la banda proibita è talmente piccola che a temperatura ambiente c'è una certa probabilità che gli elettroni si trovino a saltare la banda proibita per agitazione termica, e dunque il sistema si trovi in una situazione prossima a quella di un metallo, con valori di conducibilità elettrica non nulli.

(N.B paragrafo proveniente da Wikipedia)

