

# 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>

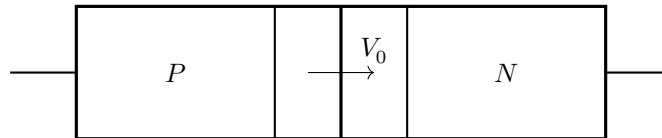


Figura 1.1: Giunzione pn

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)  $I_D$  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.: Nella zona n i **portatori maggioritari** di carica sono le cariche negative, mentre nella zona p sono le cariche positive

Tale fenomeno carica in modo *positivo* il semiconduttore drogato n (meno elettroni), e in modo *negativo* il semiconduttore drogato p (più elettroni).

Le lacune che si diffondono dalla regione/zona p alla n si ricombinano con gli elettroni liberi, *scomparendo*. Di conseguenza, il numero di elettroni liberi nella zona n *diminuisce*, quindi non saranno più neutralizzate alcune cariche fisse positive (atomi donatori). Dal momento che questa ricombinazione avviene in prossimità della giunzione, accanto a questa si svilupperà una regione **svuotata** di elettroni, con cariche fisse positive non compensate.

Analogamente nella zona p otterremo una zona svuotata dalle lacune e che comprende delle cariche fisse (in questo caso negative) non compensate.

Entrambe queste zone danno luogo alla **regione di svuotamento**<sup>8</sup> (o di carica spaziale, in inglese *depletion layer*). Inoltre lo spostamento delle cariche crea a cavallo della giunzione un campo elettrico, con la zona n positiva rispetto alla zona p. La presenza del campo elettrico comporta la presenza di una differenza di potenziale. Questa è anche detta **barriera di potenziale**<sup>9</sup>, in quanto si oppone ad un'ulteriore diffusione ai portatori di carica soggetti alla spinta della diffusione (si oppone al movimento di elettroni nella regione p e lacune nella regione n). Una volta che la corrente di diffusione equivale la corrente di trascinamento<sup>10</sup>  $I_S$  raggiungiamo un **equilibrio** (dinamica): La presenza del campo elettrico comporta la presenza di una differenza di potenziale.

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

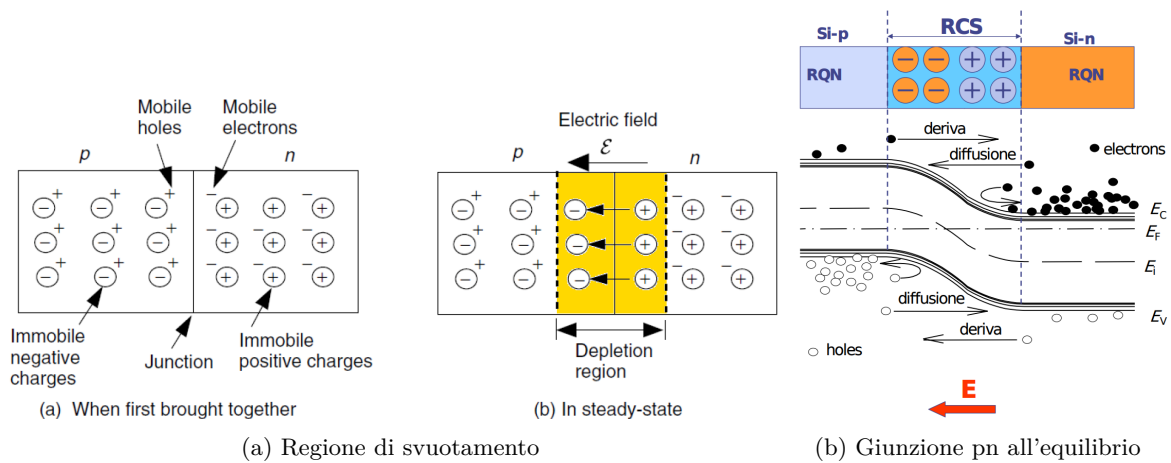
<sup>6</sup>Nella pratica parto da un blocco puro di silicio, per poi iniettare a *strati* il drogaggio.

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

<sup>8</sup>Svuotata di portatori **mobili**

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

<sup>10</sup>Detta anche corrente di deriva (drift), in questo caso i portatori si muovono perché **spinti** dal campo elettrico dovuto allo squilibrio di carica.



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

$$x_p N_A = x_n N_D$$

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

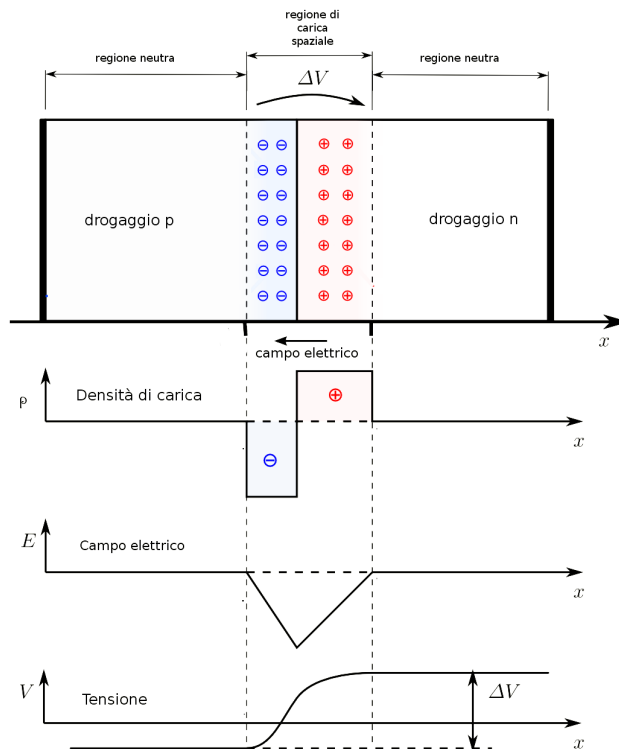


Figura 1.3: Grafici relativi al potenziale, al campo elettrico e alla carica nella giunzione pn

Come si vede nella @fig:1.3 :

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

### 1.1.2 Diodo

Il simbolo circuitale della giunzione p-n, detta **diodo**<sup>11</sup> è

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

<sup>11</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.

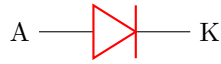


Figura 1.4: Diodo

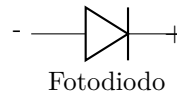
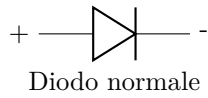
Sia la zona p che la zona n sono munite di un contatto elettrico (detto **reoforo**), in modo tale che sia possibile applicarvi una tensione. È da notare come la zona n in contatto col suo reoforo deve essere molto drogata (approfondire).

#### 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





# 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.

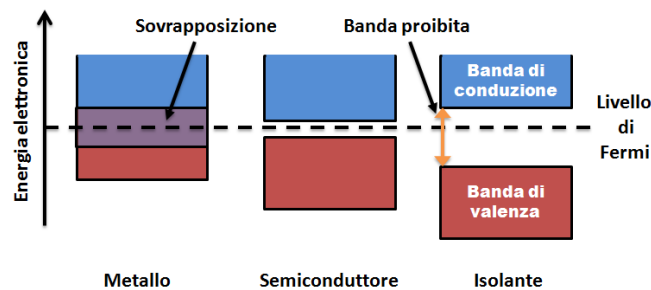


Figura B.1: Schema semplificato della struttura elettronica a bande per metalli, semiconduttori e isolanti.

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)

