



Principi di bioingegneria

Lezione 17

Caratterizzazione elettrica dei materiali

Gabriele Maria Fortunato

gabriele.fortunato@unipi.it

Conduttori, isolanti e semiconduttori

- I materiali si possono classificare in base al loro comportamento elettrico in:
 - **CONDUTTORI:**
presenza di cariche elettriche “mobili” che possono spostarsi sotto l’azione di forze elettriche
 - **ISOLANTI (o dielettrici):**
Cariche elettriche fortemente legate agli atomi e non disponibili per costituire una corrente
 - **SEMICONDUTTORI**

Conduttori e semiconduttori

- A livello macroscopico, la differenza più significativa fra conduttori e semiconduttori, consiste nel fatto che:
 - i semiconduttori conducono la corrente elettrica mediante **due modi distinti e indipendenti** di muoversi degli elettroni; anche se uno di questi modi può, a livello macroscopico, esser descritto in termini di **flusso di cariche negative**, l'altro deve venire descritto come un **flusso di cariche positive**.
 - i metalli, invece, conducono solamente mediante **portatori di cariche negative**; sono, pertanto, **completamente assenti** i **portatori di cariche positive**.
- È questa distinzione che sta alla base del funzionamento della maggior parte dei dispositivi a semiconduttori a giunzione, compresi diodi e transistori bipolari.

La conduzione nei metalli

- Nella maggior parte, i metalli sono buoni conduttori di elettricità poiché contengono concentrazioni elevate di elettroni liberi o mobili
- Gli elettroni esterni o di valenza sono mobili nel senso che non sono legati agli atomi del reticolo del metallo, non possono essere considerati appartenenti ad alcun atomo in particolare avendo perso completamente la loro “individualità”, ma sono liberi di muoversi e quindi vagare liberamente da un atomo all'altro entro il volume del metallo stesso.

La conduzione nei metalli

- Per la maggior parte dei metalli questi elettroni liberi possono essere visti come un “gas” o come un “mare di elettroni liberi”, uniformemente distribuito, in cui sono immersi i nuclei ioni degli atomi, e che permea il volume del metallo. Normalmente ogni atomo fornisce a questo gas elettronico solo uno o due elettroni di valenza, gli altri non sono liberi di muoversi lungo il volume, ma risultano costretti a restare associati “legati” a particolari nuclei.
- Poiché gli atomi di ogni solido hanno una concentrazione (**numero di atomi contenuti nel volume**) che è dell'ordine del **numero di Avogadro**, circa **$6 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$** , consegue che gli **elettroni liberi** di un metallo hanno una concentrazione dell'ordine di **10^{23} elettroni per centimetro cubo**.

La conduzione nei metalli

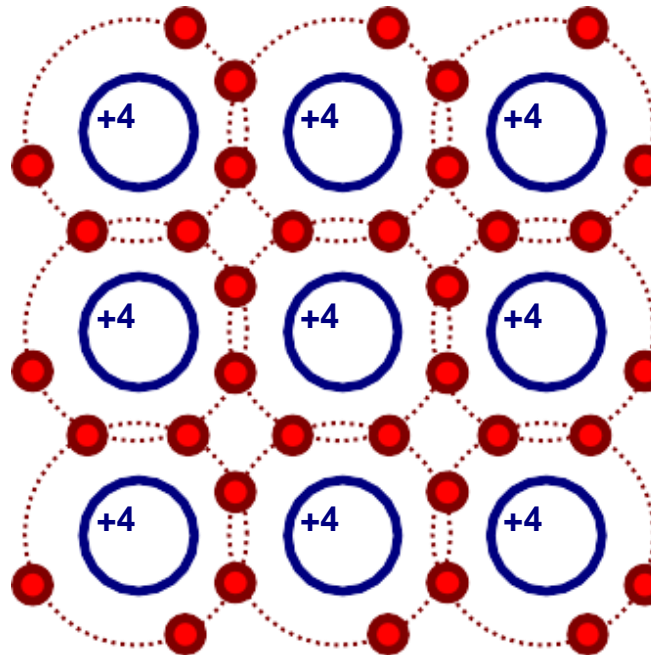
- *Un metallo è elettricamente neutro poiché la carica negativa degli elettroni liberi è compensata esattamente dalla carica positiva associata ai nuclei e agli elettroni legati degli atomi metallici.*
- Quando un atomo fornisce un elettrone di valenza al gas elettronico, l'atomo stesso rimane fisso nella propria posizione come ione positivo, con una carica uguale in valore, ma opposta in segno, alla carica elettronica. La distribuzione degli ioni metallici, sebbene essi costituiscano uno sfondo di cariche positive, non dà alcun contributo alla conduzione elettrica perché essi sono immobili, ossia, non possono muoversi lungo il volume del metallo.
- *La conduzione nei metalli è, pertanto, un **processo a singolo portatore**, che riguarda soltanto le cariche negative.*

La conduzione nei semiconduttori

- Gli **elettroni di valenza** di un **atomo** di **semiconduttore NON sono**, per la maggior parte, **liberi di muoversi** attraverso il volume del materiale, ma fanno parte del “**legame covalente**” che unisce lo insieme degli atomi del semiconduttore in una disposizione **cristallina periodica**.
- Una rappresentazione in forma bidimensionale delle caratteristiche essenziali proprie della struttura cristallina conosciuta come ***il modello a legame bidimensionale***, descrive la situazione reale a **tre** dimensioni per due aspetti importanti:
 - ⇒ **ogni atomo di semiconduttore è circondato da quattro atomi vicini;**
 - ⇒ **gli elettroni di valenza, in numero di quattro per atomo, sono messi in comune, nello stesso modo, coi quattro vicini; di conseguenza, ogni legame tra un atomo ed i suoi vicini contiene due elettroni.**

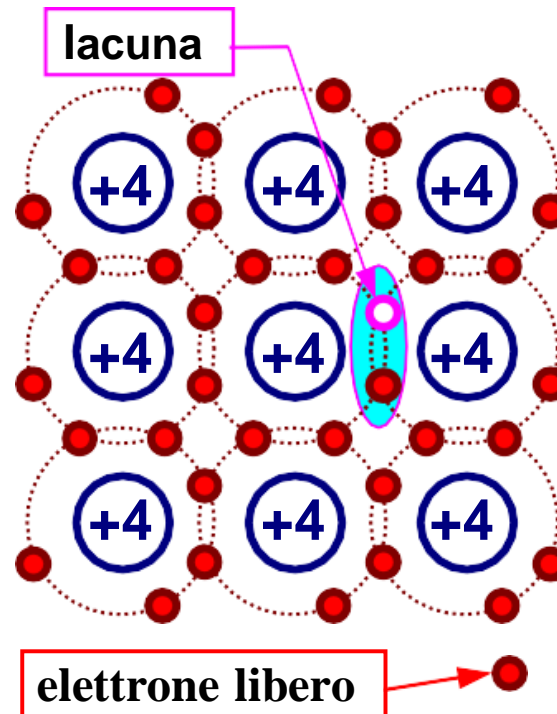
La conduzione nei semiconduttori

- Quando, come risulta allo **zero assoluto 0°K** , **tutti gli elettroni di valenza sono *trattenuti* nei legami covalenti**, ***NON* è *POSSIBILE* la conduzione elettrica** in quanto ***NON ESISTONO* portatori di carica liberi di muoversi**. In tale contesto, consegue che un materiale che abbia questa **disposizione elettronica** si comporta come un **isolante**.



La conduzione nei semiconduttori

- A **tutte** le temperature sopra lo zero assoluto la distribuzione reale degli elettroni di valenza in un semiconduttore differisce da quella della figura per un aspetto molto importante; infatti **ALCUNI legami covalenti sono incompleti**. Gli **elettroni che mancano a questi legami** non sono più confinati alla zona del legame stesso, ma **sono liberi di muoversi**.



La conduzione nei semiconduttori

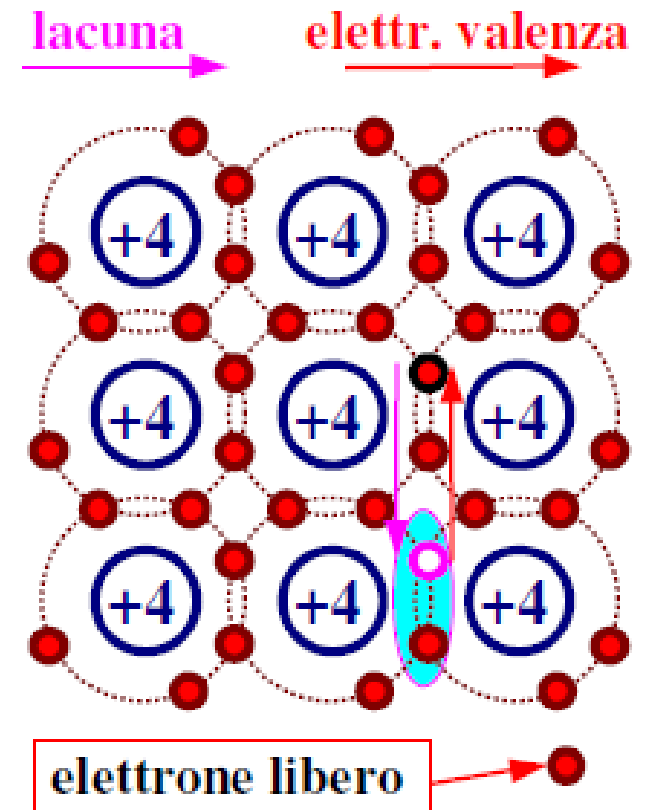
- I pochissimi **legami rotti**, che si hanno alle temperature normali, temperatura ambiente **300 °K**, derivano dall'**agitazione termica** casuale degli elettroni di valenza; infatti alcuni elettroni di valenza acquistano energia sufficiente per **sganciarsi** dai legami e diventare **liberi**.
- La frazione di elettroni di valenza **sganciati** dai legami covalenti è molto piccola; nel germanio alla **temperatura ambiente 300 °K**, per esempio, sussistono circa **10^{13} legami rotti per centimetro cubo**. Dato che vi sono **10^{23} atomi** per centimetro cubo, si evince che **soltanto un atomo ogni dieci miliardi ha un legame rotto**. Ciò nonostante, tali **eventi** hanno un effetto enorme sulle **proprietà elettriche** dei **semiconduttori** rendendo **possibile la conduzione**.

La conduzione nei semiconduttori

- Il materiale è considerato **semiconduttore**, invece di **isolante**, quando il **numero di legami rotti** è dell'ordine è circa di **10^8** per **centimetro cubo**.
- Come conseguenza dei legami **covalenti rotti**, esistono due gruppi distinti e indipendenti di portatori di carica che possono sostenere la corrente elettrica. Gli **elettroni mobili**, che **sono prodotti quando un elettrone di valenza si sgancia da un legame covalente**, costituiscono una classe di portatori di carica: questi ***elettroni di conduzione***, che portano una **carica negativa $-q$** (con **$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C**) possono muoversi nel semiconduttore, **producendo così corrente nello stesso modo degli elettroni liberi nei metalli**.

La conduzione nei semiconduttori

- L'altro portatore della carica è associato agli elettroni di valenza che rimangono confinati nei legami covalenti. Un **legame rotto** è associato ad una **regione localizzata** di **carica positiva**; nelle vicinanze del legame rotto c'è un **eccesso di carica ionica positiva** rispetto alla **carica elettronica negativa**, e l'eccesso ammonta a $+q$. Questa regione di carica positiva viene chiamata **lacuna** perché deriva da **un difetto o vacanza nella struttura del legame**.
- Il moto della lacuna si verifica nel semiconduttore **indipendentemente** dagli elettroni di conduzione; il moto della carica positiva localizzata avviene perché un elettrone di valenza in un legame prossimo al legame rotto, cioè vicino alla lacuna, può riempire la vacanza, facendo così muovere la lacuna nel verso opposto



La conduzione nei semiconduttori

- *Gli elettroni di valenza possono così muoversi in questo modo da legame a legame senza mai acquistare quella energia sufficiente per liberarsi dalla struttura dei legami. La lacuna può muoversi per tutto il materiale senza minimamente coinvolgere gli elettroni di conduzione.*
- I concetti di **lacune** e di **elettroni di conduzione** sono assunti come **modello del processo di conduzione nei semiconduttori**.
- *Sia le lacune che gli elettroni di conduzione possono essere considerati nei confronti del comportamento elettrico, come portatori mobili indipendenti con cariche di segno opposto.*

I semiconduttori

I semiconduttori sono materiali dotati di una proprietà particolare:

- ☞ a **temperatura molto bassa** (vicina allo zero assoluto), si comportano come **isolanti**;
- ☞ **aumentando** la temperatura, il valore della **resistività diminuisce** e sono in grado di condurre una piccola corrente;
- ☞ a **temperatura ambiente** (27° C) i semiconduttori presentano un valore di **resistività compreso** tra quello dei **conduttori** e quello degli **isolanti**.

Ricordiamo che la **resistività** (o resistenza specifica) di un certo materiale è la resistenza di un pezzo di materiale di lunghezza 1 m e sezione 1 m².

Si misura generalmente in $\Omega \times \text{cm}$ o in $\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$

I semiconduttori

La resistività nei conduttori, negli isolanti e nei semiconduttori a temperatura ambiente

Conduttori	Resistività ($\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$)	Isolanti	Resistività ($\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$)
Argento	$1,6 \times 10^{-2}$	Zolfo	10^{21}
Rame	$1,7 \times 10^{-2}$	Legno secco	10^{31}
Oro	$2,4 \times 10^{-2}$	Vetro	10^{36}
Alluminio	$2,8 \times 10^{-2}$	Mica	10^{38}

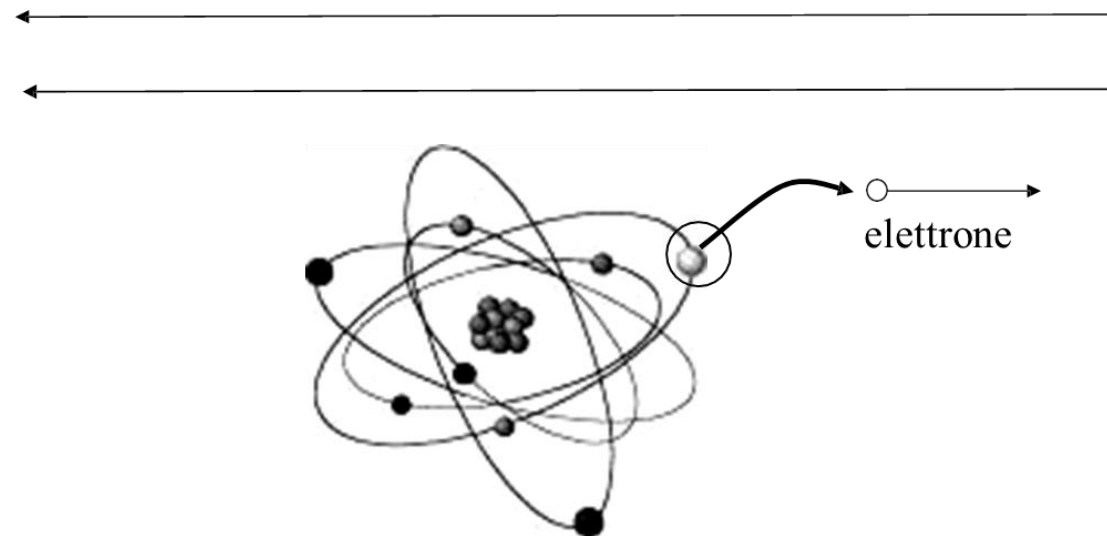
Semiconduttori	Resistività ($\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$)
Germanio	$6,0 \times 10^3$
Silicio	$2,3 \times 10^9$

Da cosa dipende la resistività

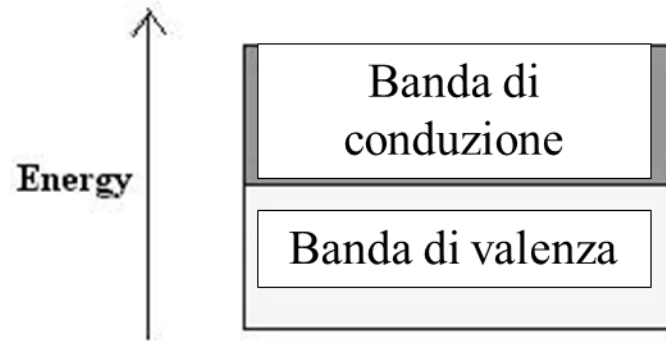
- La resistività dipende dal tipo di legame tra gli elettroni e gli atomi del materiale.
- Nel caso dei **conduttori** il movimento delle cariche, sotto l'azione di un campo elettrico esterno (prodotto applicando una differenza di potenziale) produce il passaggio di una corrente (=cariche in moto).
- Nei materiali **isolanti** gli elettroni sono **legati** agli atomi ed è necessaria una grande **quantità di energia** per rompere i legami.
- Cosa accade nei semiconduttori?

Gli elettroni nei semiconduttori

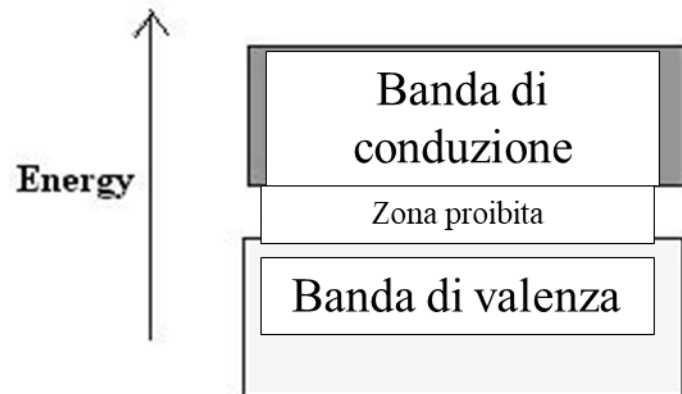
- Gli elettroni, all'interno dei materiali semiconduttori, sono legati agli atomi.
- Il moto di agitazione termica degli atomi è però sufficiente a rompere alcuni legami.
- Alcuni elettroni, rimasti liberi, possono quindi muoversi sotto l'effetto del campo elettrico.



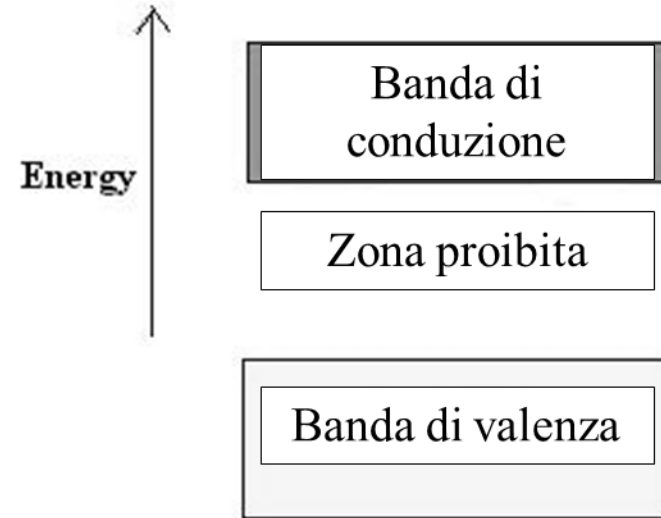
Le bande di energia



Conduttori metallici



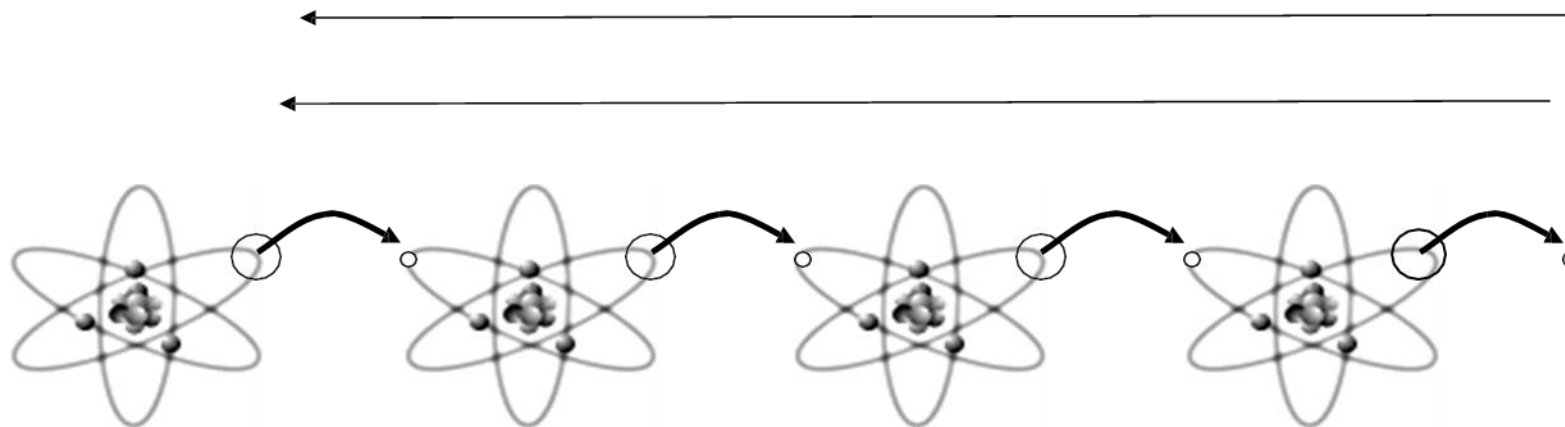
Semiconduttori



Isolanti

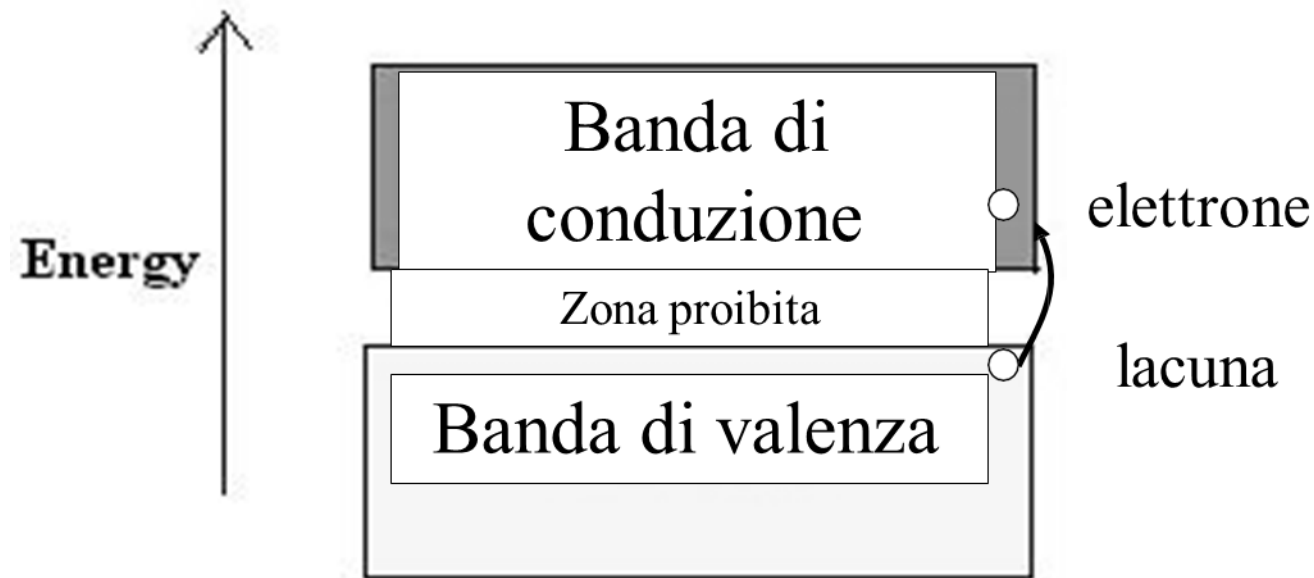
Le lacune

- Ogni elettrone libero lascia un posto vuoto (una “lacuna”) che può essere occupato da un altro elettrone vicino, il quale lascia a sua volta un posto vacante.
- Questo spostamento di elettroni, che saltano da un atomo all'altro, è a tutti gli effetti una corrente (cioè un movimento di cariche).
- I posti vuoti, cioè le lacune, possono essere considerate come cariche elettriche positive; il loro movimento è opposto rispetto agli elettroni (che hanno carica negativa).



Lacune ed elettroni

- Per ogni elettrone che salta nella banda di conduzione (cioè che acquista l'energia necessaria a rompere il legame atomico) si genera una lacuna nella banda di valenza



Drogaggio

- Il numero di cariche che possono liberarsi dal legame atomico può essere aumentato, inserendo nel materiale delle quantità piccolissime di altri elementi (meno di un atomo ogni milione di atomi di semiconduttore), chiamati **droganti**. Con processi tecnologici possono quindi essere variate le proprietà elettriche del semiconduttore.
- I droganti che forniscono elettroni si definiscono “**donatori**”, quelli che forniscono lacune si dicono “**accettori**”.
 - Elementi donatori: arsenico (As), fosforo (P), antimonio (Sb).
 - Elementi accettori: boro (B), gallio (Ga), indio (In).

Il silicio

- Il semiconduttore impiegato nei componenti elettronici commerciali è il Silicio.
- È un elemento molto diffuso in natura: è presente nella sabbia e in molti minerali (i silicati).
- Per ottenere il materiale adatto alle applicazioni elettroniche è indispensabile sottoporre i silicati ad un processo di purificazione, in modo da eliminare tutte le impurità naturalmente presenti

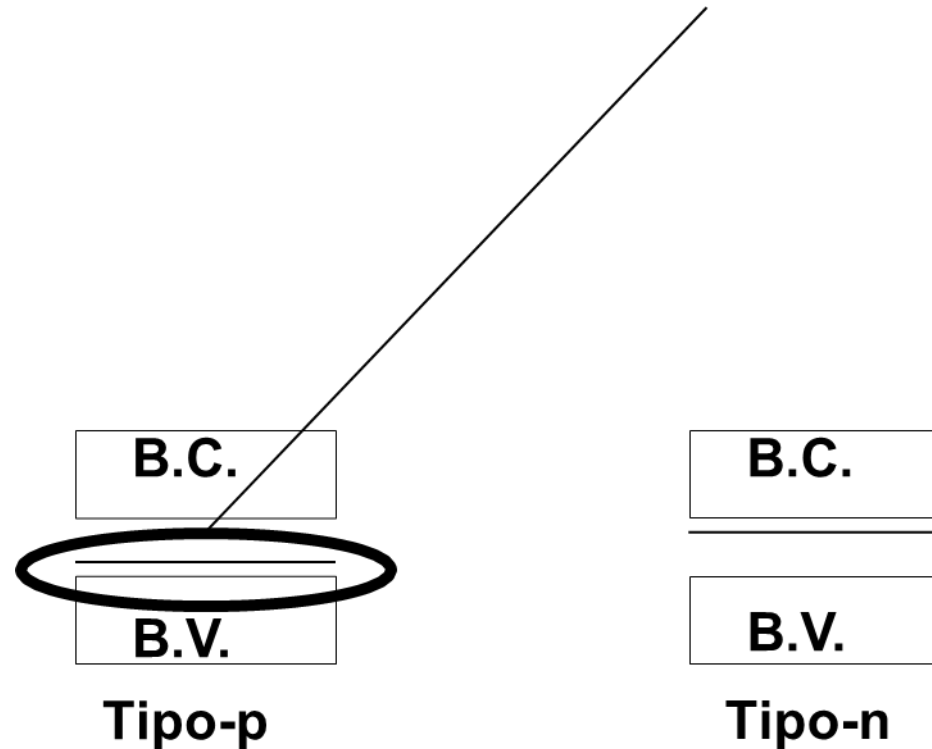
Semiconduttori intrinseci e drogati

- Il silicio puro è un esempio di semiconduttore intrinseco.
 - Se introduciamo degli accettori, quindi aumentiamo il livello delle cariche positive, il silicio viene detto di tipo p.
 - Se introduciamo dei donatori, il silicio viene detto di tipo n.

Droganti	Tipo di semiconduttore
nessuno	intrinseco
accettori	Tipo p
donatori	Tipo n

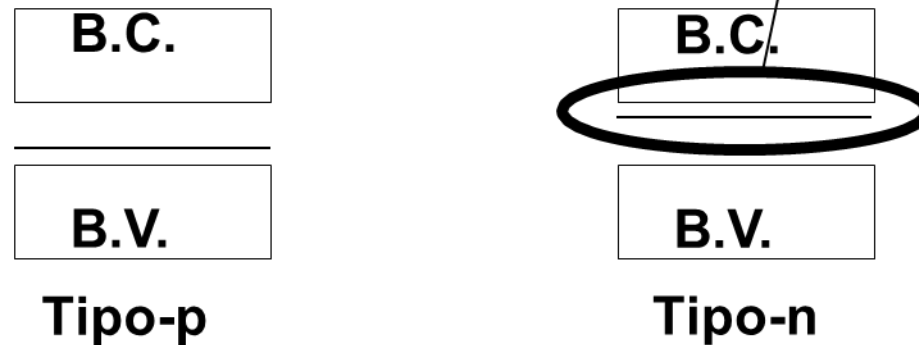
Tipo-p

- Impurezze che introducono livelli vicini alla banda di valenza danno luogo a un materiale in cui domina il trasporto di corrente per lacune.



Tipo-n

- Impurezze che introducono livelli vicini alla banda di conduzione danno luogo a un materiale in cui domina il trasporto di corrente per elettroni.



Caratterizzazione elettrica

- Analisi in frequenza
- Fitting dati sperimentali
- Funzione di trasferimento
- Circuito elettrico equivalente
- Estrazione parametri circuitali

Analisi in frequenza

- L'analisi in frequenza consiste nell'analizzare il comportamento di un circuito in regime sinusoidale alle diverse frequenze: cioè non modificando l'ampiezza (o le ampiezze) del segnale sinusoidale che costituisce l'alimentazione e variarne invece la frequenza. Per studiare il comportamento del circuito al variare della frequenza, individuata una grandezza elettrica di interesse $y(t)$, si tratta di studiarne la così detta risposta in frequenza, cioè la variazione del comportamento di tale grandezza al variare della frequenza.

Analisi in frequenza

- Uno strumento analitico utile per determinare la risposta in frequenza è la Funzione di Trasferimento (FdT) $\dot{H}(\omega)$. Essa è definita come il rapporto fra il fasore dell'uscita $\bar{Y}(\omega)$ (tensione o corrente) e il fasore dell'ingresso $\bar{X}(\omega)$ (tensione o corrente), sempre definito in funzione della pulsazione ω .

$$\dot{H}(\omega) = \frac{\bar{Y}(\omega)}{\bar{X}(\omega)} = |H(\omega)| \angle \phi$$

Funzione di trasferimento

- La funzione di trasferimento descrive il comportamento del circuito al variare della frequenza di ingresso
- E' definita nel dominio della frequenza
- E' il rapporto fra il fasore corrispondente alla sinusoide di uscita e il fasore corrispondente alla sinusoide di ingresso
- La risposta in frequenza può essere considerata come la variazione del guadagno e della fase della funzione di trasferimento del circuito.
- Supponendo nulle le condizioni iniziali, a seconda della natura dei segnali di ingresso e di uscita, possiamo avere quattro differenti funzioni di trasferimento.

Funzione di trasferimento

- Se l'ingresso è una tensione e l'uscita è una tensione la funzione di trasferimento prende il nome di Guadagno di tensione:

$$\dot{H}(\omega) = \frac{\bar{V}_o(\omega)}{\bar{V}_i(\omega)} = \text{Guadagno di tensione}$$

- Se l'ingresso è una corrente e l'uscita una tensione la funzione di trasferimento prende il nome di Impedenza di trasferimento (se i morsetti di ingresso e uscita coincidono sarà l'impedenza vista dai quei morsetti):

$$\dot{H}(\omega) = \frac{\bar{V}_o(\omega)}{\bar{I}_i(\omega)} = \text{Impedenza di trasferimento}$$

Funzione di trasferimento

- Se l'ingresso è una corrente e l'uscita è una corrente la funzione di trasferimento si chiamerà Guadagno di corrente:

$$\dot{H}(\omega) = \frac{\bar{I}_o(\omega)}{\bar{I}_i(\omega)} = \text{Guadagno di corrente}$$

- Infine, se l'ingresso è una tensione e l'uscita una corrente la FdT sarà una Ammettenza di trasferimento. Anche in questo caso se ingresso e uscita sono presi alla stessa coppia di morsetti la FdT sarà l'ammettenza vista da questi morsetti.

$$\dot{H}(\omega) = \frac{\bar{I}_o(\omega)}{\bar{V}_i(\omega)} = \text{Ammettenza di trasferimento}$$

Funzione di trasferimento

- Data la funzione di trasferimento, definiamo guadagno il modulo della stessa al variare di ω e sfasamento la sua fase, pari alla fase del fasore di uscita meno la fase del fasore dell'ingresso. L'insieme delle espressioni che danno il guadagno e lo sfasamento in funzione della frequenza è la **Risposta in frequenza**.

Funzione di rete $\dot{H}(j\omega) = \frac{\bar{Y}(j\omega)}{\bar{X}(j\omega)}$

Guadagno $G = \left| \dot{H}(j\omega) \right| = \frac{|\bar{Y}(j\omega)|}{|\bar{X}(j\omega)|}$

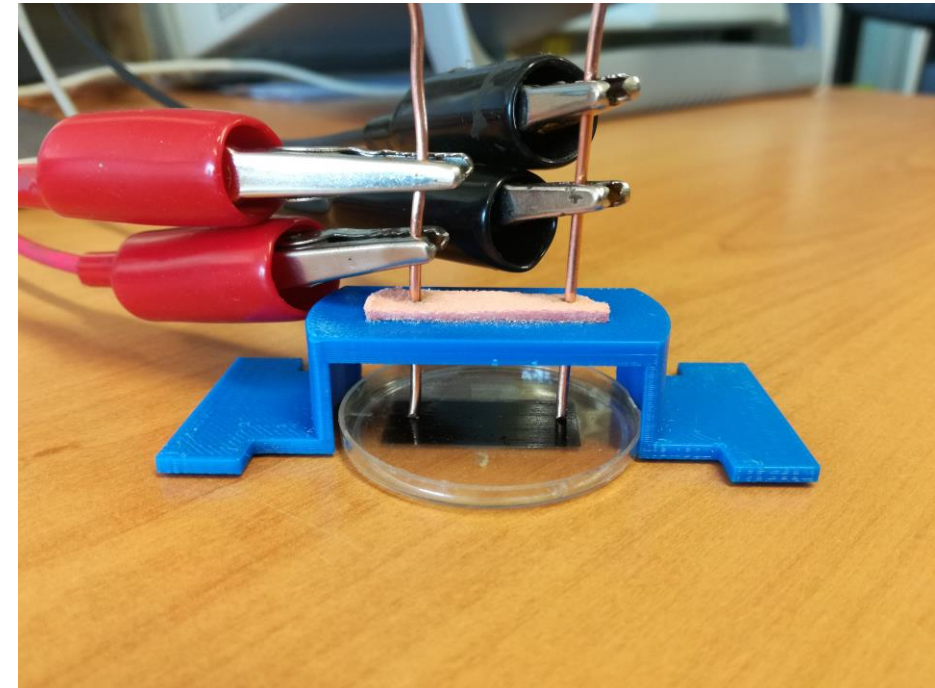
Sfasamento $fase(\dot{H}(j\omega)) = fase(\bar{Y}(j\omega)) - fase(\bar{X}(j\omega))$

Funzione di trasferimento

- La risposta in frequenza è quindi il grafico della funzione di trasferimento del circuito al variare di ω da 0 a infinito. In particolare il grafico del modulo e della fase della funzione di trasferimento. Cambiando la frequenza di ingresso anche il guadagno e lo sfasamento cambiano.
- La funzione di trasferimento può essere espressa anche come il rapporto tra due polinomi in $(j\omega)$. Le radici del polinomio a numeratore sono chiamate zeri della FdT mentre le radici del polinomio a denominatore sono chiamate poli. Uno zero è un valore che rende nulla la funzione mentre un polo la rende infinita.

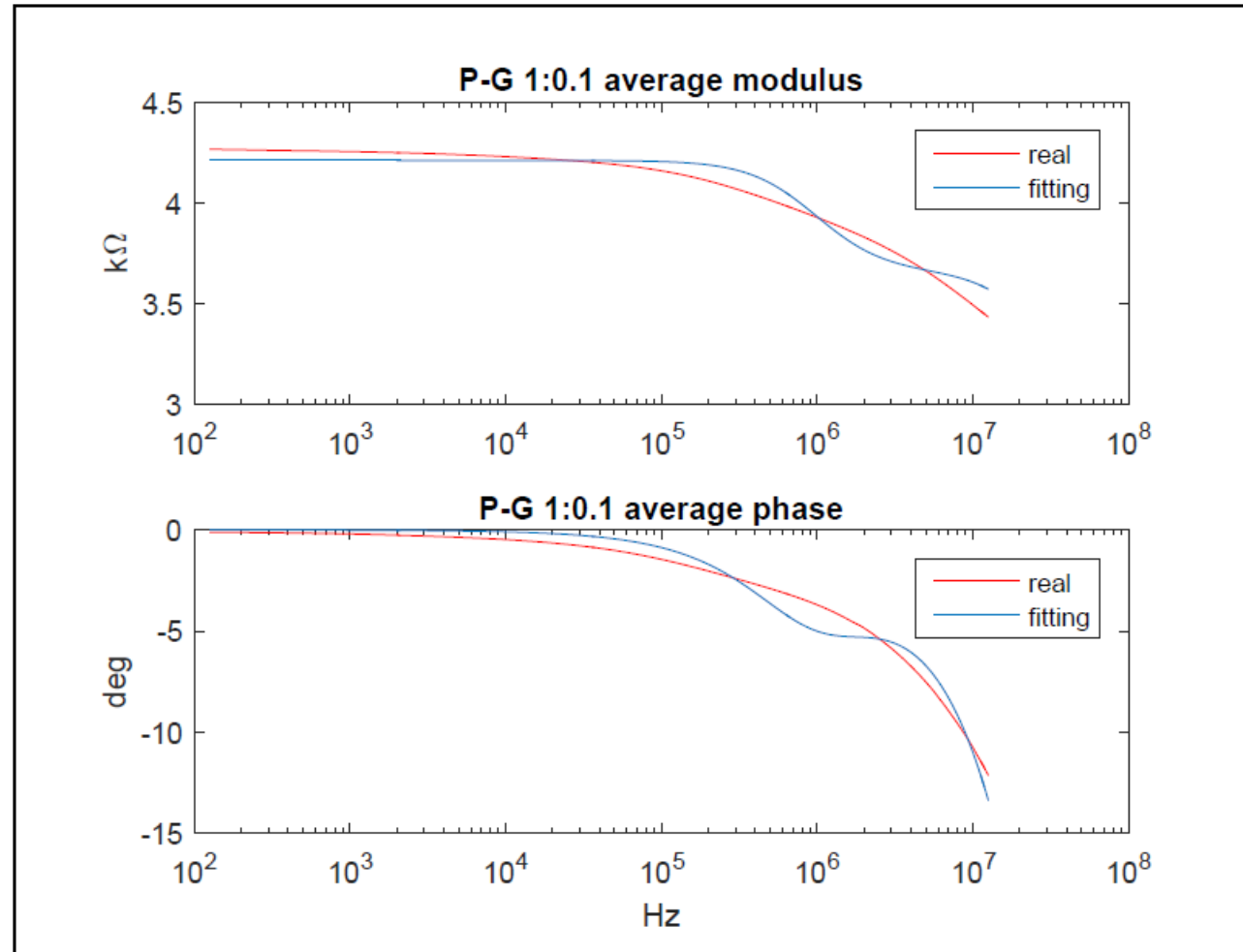
Esempio

- Misura sperimentale impedenza
- Film a base di Gelatina+PEDOT
- Acquisizione modulo e fase impedenza in frequenza (20 Hz-2MHz) con configurazione a 4 punte



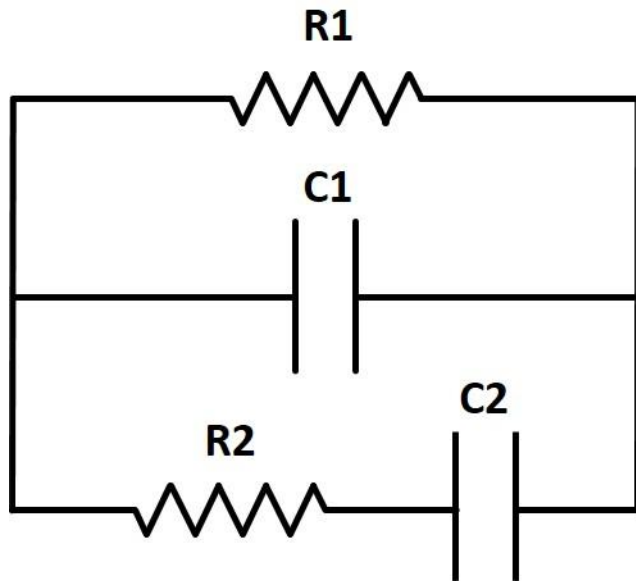
Esempio

- Fitting dati sperimentali per determinare la FDT



Esempio

- Identificazione circuito elettrico con stesso tipo di FDT
 - Calcolo impedenza equivalente



$$H(\omega) = \frac{\frac{1}{C1}s + \frac{1}{R2C1C2}}{s^2 + \frac{R1C1 + R2C2 + R1C2}{R1R2C1C2}s + \frac{1}{R1R2C1C2}}$$

Esempio

- Estrazione parametri circuitali

$$H(\omega) = \frac{\overset{A}{\frac{1}{C1}}s + \overset{B}{\frac{1}{R2C1C2}}}{s^2 + \underbrace{\frac{R1C1 + R2C2 + R1C2}{R1R2C1C2}}_C s + \underbrace{\frac{1}{R1R2C1C2}}_D}$$



- 4 equazioni, 4 incognite: R1, R2, C1, C2